

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DA NATUREZA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA**

**Aspectos Hidrogeoquímicos e de Qualidade da Água do
Aquífero Costeiro de Itaipuaçu, Maricá – RJ.**

Trabalho Final de Curso

Patrícia Helena Martha da Silveira

**UFRJ
Rio de Janeiro
2013**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DA NATUREZA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA**

Patrícia Helena Martha da Silveira

**Aspectos Hidrogeoquímicos e de Qualidade da Água do Aquífero
Costeiro de Itaipuaçu, Maricá – RJ.**

Trabalho Final de Curso de Graduação em Geologia do Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, apresentado como requisito necessário para obtenção do grau de Geólogo.

Orientador(es):

Prof. Dr. Gerson Cardoso da Silva Jr.
(UFRJ)

Geól. Vinícius do Nascimento Cristo, M.Sc.

**UFRJ
Rio de Janeiro
2013**

SILVEIRA, Patrícia Helena Martha da.
Aspectos Hidrogeoquímicos e de Qualidade da Água do
Aqüífero Costeiro de Itaipuaçu, Maricá – RJ/ Patrícia
Helena Martha da Silveira - Rio de Janeiro: UFRJ / IGeo,
2013.
ix, 84 p.: il.; 30cm
Trabalho de conclusão de Curso (Geologia) –
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de
Geociências, Departamento de Geologia, ano.
Orientador(es): Gerson Cardoso da Silva Jr., Vinícius do
Nascimento Cristo
1. Hidrogeologia. 2. Hidrogeoquímica. 3. Isotopia 4.
Maricá. 5.Geologia. I. Silva Jr., Gerson Cardoso da;
Cristo, Vinícius do Nascimento. II. Universidade Federal
do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências,
Departamento de Geologia. III. Título.

Patrícia Helena Martha da Silveira

Aspectos Hidrogeoquímicos e de Qualidade da Água do Aquífero Costeiro de Itaipuaçu, Maricá – RJ.

Trabalho Final de Curso de Graduação em Geologia do Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, apresentado como requisito necessário para obtenção do grau de Geólogo.

Orientador(es):

Prof. Dr. Gerson Cardoso da Silva Jr.
(UFRJ)

Geól. Vinícius do Nascimento Cristo, M.Sc.

Aprovada em: ____/____/____

Por:

Orientador: Prof. Dr. Gerson Cardoso da Silva JR. (UFRJ)

Orientador: Geólogo Msc. Vinícius do Nascimento Cristo

Msc. Elisa de Souza Bento Fernandes (DRM)

Prof. Dra. Maria da Glória Alves (UENF)

UFRJ
Rio de Janeiro
2013

Mais um passo!
Entusiasme-se e
Vamos dar mais um passo,
Mesmo que tropece.
Reúna mais alegria
E mais vigor;
Dê outro passo.
Hoje, mesmo que não tenha êxito,
Mesmo que não corra tudo bem,
Vença amanhã!
Dr. Daisaku Ikeda

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço aos meus pais, Celeste e Sérgio e minha irmã Ana Paula, por todas as vezes que me incentivaram seguir em frente. Sem nunca desistirem de mim, me apoiando e incentivando sempre, mesmo com as mudanças de humor repentinas.

Ao meu grande amigo e, mais que isso, meu namorado Marcos, por sempre me apoiar, aguentar minhas mudanças repentinas de humor, e quando eu pensava em desistir ele não me deixava cair.

As minhas queridas amigas, Erika e Ariadne, que inesperadas apareceram em minha vida, que sem elas eu não teria chegado ao final dessa jornada. Muitas histórias, risos e apoio.

Aos meus amigos que complementaram minha vida tanto acadêmica quanto pessoal, Sabrina, Daniel, Rodrigo, Bernardo, Sebastião.

As minhas amigas de longas datas que perto ou longe sempre me incentivaram a continuar em frente, Angélica, Joelma, Juliana, Helena e Sarah.

Ao meu orientador Prof. Gerson pelo apoio, conhecimento e acima de tudo confiança passado ao longo desses períodos mesmo quando me ausentei sem explicações.

Ao meu Orientador Vinícius Cristo que me ajudou com muita paciência e contribuiu com muitas ideias para a realização e concretização dessa monografia.

Aos meus amigos do laboratório de Hidrogeologia em especial ao Glauco e ao Helisson pelo grande apoio.

Ao meu mestre da vida Daisaku Ikeda por tantos incentivos maravilhosos que sempre envia com carinho aos seus discípulos.

Aos demais amigos e colegas que por cansaço mental não consegui me recordar...

A UFRJ/CNPq pela concessão de bolsa de Iniciação Científica.

E a Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) pelo financiamento do Projeto Hidroq-Rio (APQ1).

Agradeço com muito carinho a todos que participaram da minha formação.

SUMÁRIO

RESUMO	xii
ABSTRACT	xiii
1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	1
1.1 Introdução.....	1
1.2 Objetivos	3
2 Caracterização da área de estudo	4
2.1 Localização.....	4
2.2 Geologia Regional	5
2.3 Geologia Local	6
2.4 Hidrogeologia	7
2.5 Clima.....	8
3 METODOLOGIA	11
3.1 Levantamento de Dados.....	11
3.1.1 Levantamento de dados pré-existentes	11
3.1.2 Campanhas de campo	12
3.1.3 Preparação da base de dados	12
3.2 Caracterização e Interpretação Geoquímica.....	13
3.2.1 Diagramas Hidroquímicos	13
3.2.1.1 Diagrama de Piper	13
3.2.1.2 Diagrama de Stiff.....	14
3.2.1.3 Diagrama logarítmico de Schoeller	15
3.2.2 Razões Iônicas	15
3.2.3 Mapas hidrogeoquímicos da área de estudo.....	16
3.2.4 Emprego do Programa <i>PhreeqcI</i>	18
3.2.5 Isotopia.....	19
3.2.5.1 Oxigênio-18 ($\delta^{18}\text{O-H}_2\text{O}$)	21

3.2.5.2	Deutério ($\delta^2\text{H-H}_2\text{O}$)	21
3.2.6	Qualidade da Água Subterrânea.	22
3.2.6.1	Cálculo do erro cometido em análises físico-químicas.	22
3.2.6.2	Padrão da Qualidade da Água.	22
3.2.6.3	Risco Salino.....	26
4	RESULTADOS.....	28
4.1	Cadastro de poços.	28
4.2	Caracterização e Interpretação Hidrogeoquímica.....	30
4.2.1	Cálculo do Erro das análises Físico-químicas.	30
4.2.2	Mapas de Isovalores.....	32
4.2.2.1	Isovalores de pH.....	32
4.2.2.2	Isovalores de Condutividade Elétrica	32
4.2.3	Diagramas Hidroquímicos	35
4.2.3.1	Diagrama de Piper	35
4.2.3.1	Diagrama de Stiff.....	35
4.2.3.2	Diagrama de Schoeller.....	38
4.2.4	Qualidade da Água Subterrânea	38
4.2.5	Risco Salino.....	46
4.2.6	Razões Iônicas	47
4.2.6.1	Razão $\text{rMg}^{+2}/\text{rCa}^{+2}$	47
4.2.6.2	Razão $\text{rCl}/\text{HCO}_3^-$	47
4.2.6.1	Razão rCl/rBr^-	48
4.2.6.2	Razão rNa^+/Cl^-	49
4.2.6.3	Índice de Saturação (SI).....	50
4.2.6.4	Índice de saturação da Calcita.....	51
4.2.6.5	Índice de saturação da Dolomita	52
4.2.6.6	Índice de saturação da Gipsita.....	53

4.2.6.7	Índice de saturação da Goethita e Hematita	53
4.2.7	Isotopia.....	55
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	58
6	BIBLIOGRAFIA	60
	APÊNDICES	64
	Apêndice 1 - Cadastro de Poços da área do estudo	65
	Apêndice 2 – Cálculo do Erro de análise das amostras.	67
	Apêndice 3 - Tabela contendo os Íons maiores usados para a confecção dos diagramas químicos da água	68
	Apêndice 4 - Razões Iônicas e Concentrações iônicas (meq/L).....	69
	Apêndice 5 - Tabela de cálculo do RAS (Razão de adsorção de sódio)	70

Índice de Figuras

Figura 1 - Localização da área do estudo no distrito de Itaipuaçu, Maricá, com indicação dos pontos de cadastro de poços.....	4
Figura 2 - Carta geológica de Maricá 1:100.000 (Eger, 2012).....	5
Figura 3 - Mapa da classificação climática de Köppen do Brasil – Fonte: http://murilocardoso.com/2012/01/20/mapas-classificacao-climatica-de-koppen-do-mundo-e-do-brasil/	9
Figura 4 - Diagrama de Piper e caracterização faciológica da água subterrânea pelos íons maiores.....	14
Figura 5 - Exemplo de Diagrama de Stiff.	14
Figura 6 - Exemplo de Diagrama de Schoeller.....	15
Figura 7 - Diagrama de classificação da água do United States Salinity Laboratory (USSL)	27
Figura 8 - Localização dos poços cadastrados na área do estudo.....	29
Figura 9 - Distribuição dos poços com análises físico-químicas completas na área do estudo.	29
Figura 10 - Mapa de Isovalores de pH da água subterrânea da área do estudo.....	33
Figura 11 - Mapa de Isoteores de Condutividade Elétrica na água subterrânea da área do estudo.	34
Figura 12 - Diagrama de Piper representativo da área do estudo.....	36
Figura 13 - Diagrama de Stiff representativo da área do estudo.	37
Figura 14 - Diagrama de Schoeller representativo das análises químicas da área do estudo.	38
Figura 15 - Mapa de isovalores de Sódio (Na) na água subterrânea em mg/L na área do estudo.	41
Figura 16 - Mapa de Isovalores de Cloreto (Cl) na água subterrânea em mg/L da área de estudo.	42
Figura 17 - Mapa de Isovalores de Ferro (Fe) na água subterrânea em mg/L na área do estudo.	43
Figura 18 - Mapa de Isovalores de Alumínio (Al) na água subterrânea em mg/L na área do estudo.	44
Figura 19 - Mapa de Isovalores de Nitrato (NO ₃) na água subterrânea em mg/L na área do estudo.	45

Figura 20 - Diagrama representativo do Risco Salino (Razão de Adsorção de Sódio – RAS) das águas subterrâneas da área do estudo.....	46
Figura 21 - Razão Iônica rMg/rCa característica das águas subterrâneas da área do estudo	47
Figura 22 - Razão Iônica $rCl/rHCO_3$ característica das águas subterrâneas da área do estudo	48
Figura 23 - Razão rCl/rBr em escala logarítmica característica das águas subterrâneas da área do estudo.....	49
Figura 24 - Razão Iônica rNa/rCl característica das águas subterrâneas da área do estudo.	50
Figura 25 - Índice de Saturação da Calcita das águas subterrâneas da área do estudo...	51
Figura 26 - Índice de Saturação da Dolomita das águas subterrâneas da área do estudo.	52
Figura 27 - Índice de Saturação da Gipsita das águas subterrâneas da área do estudo...	53
Figura 28 - Índice de Saturação da Goethita das águas subterrâneas da área do estudo.	54
Figura 29 - Índice de Saturação da Hematita das águas subterrâneas da área do estudo.	54
Figura 30 - Distribuição dos pontos com análises isotópicas da área do estudo.	55
Figura 31 – Reta meteórica da razão Deutério x Oxigênio-18 da área do estudo.	56
Figura 32 - Mecanismos de Identificação de Salinidade (Adaptado de Manzano Arellano, 2013).....	57
Figura 33 - Relação $Cl \times ^{18}O$ representando o mecanismo de identificação de salinidade da área do estudo segundo Manzano Arellano (2013).....	57

Índice de Tabelas

Tabela 1 Dados climáticos de Maricá – RJ	10
Tabela 2 - Tabela descritiva das razões iônicas (Modificado de FEITOSA, 2008)	17
Tabela 3 - Tabela descritiva dos Índices de Saturação	19
Tabela 4 - Tabela para VPMs dos Íons presentes na água segundo a Resolução 396/2008 (CONAMA).	23
Tabela 5 - VMPs para substâncias que apresentam risco à saúde, segundo a Portaria 2914/2011 Anvisa-MS.	25
Tabela 6 VMP para padrão organoléptico de potabilidade, segundo a Portaria 2914/2011 Anvisa-MS.	25
Tabela 7 VMP para os parâmetros físico-químicos, segundo a Portaria 2914/2011 Anvisa-MS.....	25
Tabela 8 - Erro de Análise Físico-química (medidas em meq/L).....	31
Tabela 9 - Tabela comparativa dos VMPs dos parâmetros físico-químicos com os valores das amostras analisadas.....	39
Tabela 10 - Tabela comparativa dos VMPs (valores em mg/L) para substâncias que apresentam risco à saúde	40
Tabela 11 - Índices de saturação da área do estudo	51
Tabela 12 - Dados Isotópicos da área do estudo	55

Índice de Equações

Equação 1 - Equação de conversão mg/L para meq/L.....	16
Equação 2 - Equação do índice de saturação de fases minerais em solução.....	18
Equação 3 - Equação da razão isotópica de isótopos estáveis.....	20
Equação 4 - Equação da reta meteórica mundial (Craig, 1961).	20
Equação 5 - Cálculo do erro de análise química em amostras de água.	22
Equação 6 - Equação para o cálculo da Razão de Adsorção de Sódio (RAS)	26

RESUMO

SILVEIRA, Patrícia Helena Martha. **Aspectos Hidrogeoquímicos e de Qualidade da Água do Aquífero Costeiro de Itaipuaçu, Maricá – RJ.** Ano 2013. Trabalho Final de Curso (Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

Estudos realizados em todo o mundo sobre a cunha salina em aquíferos costeiros são cada vez mais frequentes pela elevada concentração da população próxima a essas áreas e sua importância econômica. O presente trabalho tem como objetivo caracterizar os parâmetros hidroquímicos e produzir um modelo conceitual do aquífero costeiro de Itaipuaçu, Maricá-RJ, através da análise de dados físico-químicos e isotópicos. A área costeira de Maricá, no litoral leste do estado do Rio de Janeiro, tem a água subterrânea como sua principal fonte de abastecimento. Com a crescente demanda pelos recursos hídricos subterrâneos são esperados problemas de abastecimento e contaminação do aquífero, visto que o excesso de bombeamento sem controle e a poluição de origem orgânica potencializam os impactos sobre o mesmo. Para a execução do trabalho foram utilizadas diversas técnicas para estudo do aquífero, como determinações físico-químicas *in situ*, análises laboratoriais de características hidroquímicas, utilização de recursos gráficos (diagramas, gráficos de dispersão, etc.) para caracterização hidrogeoquímica e interpretação de análises isotópicas. Os principais resultados obtidos através dessa pesquisa foram: a elaboração de uma base de dados hidrogeológico para a área do estudo; a caracterização hidroquímica da água subterrânea; e a elaboração de um modelo conceitual hidrogeoquímico do aquífero como resultado do uso das técnicas citadas e o auxílio do código *PhreeqcI*.

Palavras-chave: Aquífero Costeiro, hidrogeoquímica, isotopia.

ABSTRACT

SILVEIRA, Patrícia Helena Martha. **Hydrogeochemical aspects and Water Quality of Coastal Aquifer Itaipuaçu Marica - RJ.** Ano 2013. Trabalho Final de Curso (Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

Worldwide research on saline water wedge in coastal aquifers are becoming more frequent due to the high population concentration near coastal areas. The present study aims to characterize the hydrochemical parameters and produce a conceptual model of the aquifer through the analysis of physical-chemical and isotopic data. Nowadays coastal aquifers suffer great pressure due to intense exploitation resulting in a increasingly degradation of its resources. In the coastal area of Marica city, on the east coast of Rio de Janeiro State, Brazil, groundwater is the main water supply source. With the increasing demand for groundwater resources, issues like water supply shortage and the aquifers contamination are expected to arise, since the excessive uncontrolled pumping and pollution from organic contaminants cause negative impacts on the environment. To perform this work, several techniques to study the aquifer were used, such as *in situ* analysis, laboratory analysis of physical-chemical characteristics of the water, use of graphics and diagrams for chemical characterization and isotopic analysis. The main results obtained on this research were: The elaboration of a hydrogeological database for the region; the groundwater hydrochemical characterization; and a hydrogeochemical model with the support of the methods cited above and the aid of *PhreeqcI* code.

Key words: Coastal aquifer; hydrogeochemistry; isotopic.

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

1.1 Introdução

As zonas costeiras em todo mundo são o local de trabalho, lazer ou moradia de grande parte da população. Este fato acaba gerando uma enorme pressão no sistema subterrâneo hídrico nas regiões costeiras em todo o globo. No Brasil a situação não é diferente, com muitas áreas costeiras fortemente impactadas pela ocupação e atividades antrópicas, particularmente na Região Sudeste, sendo que a situação tende a se agravar com a expansão populacional e econômica.

Considerando que o aumento populacional nessas áreas resulta num aumento da demanda da água subterrânea, os aquíferos destas regiões frequentemente têm níveis de utilização elevados. Como seus limites estão em contato com corpos de água salgada, o aumento da taxa de bombeamento pode causar o avanço da cunha salina em direção ao continente, provocando a salinização da água destes aquíferos.

Sabe-se que as áreas costeiras são muitas vezes ambientes frágeis nos quais os aquíferos podem ser facilmente contaminados, inclusive pela salinidade, gerando um problema ambiental que pode vir a ser irreversível, na prática: quando a água do mar penetra num aquífero, basta apenas uma proporção de cerca 2% do volume de água do mar para toda a mistura não apresentar mais as características de potabilidade necessárias ao consumo humano (ALMEIDA, 2009). Na maior parte das vezes os estudos realizados, assim como o presente, servem para elaboração do modelo conceitual que é gerado com o intuito de ser ter uma perspectiva mais próxima do que seria considerado o comportamento real do sistema aquífero, vindo a facilitar ações futuras de gestão.

O presente estudo foi realizado no aquífero costeiro de Itaipuaçu, distrito de Maricá, Rio de Janeiro. Esta região tem passado por um acelerado crescimento no número de habitantes. Itaipuaçu é um distrito de Maricá em que a expansão imobiliária é ainda maior que a média municipal (a segunda maior do estado do Rio de Janeiro) e ainda carece de abastecimento de redes públicas de abastecimento d'água para atender a população. Devido a este fato, a população faz uso de poços tubulares rasos, tornando o aquífero costeiro o único meio regular de abastecimento de água para a população até o presente momento, para uso complementar parte da população faz uso de carros-pipa.

Como a região carece de abastecimento de água e a coleta e tratamento de efluentes por redes públicas inexistem, isso leva à construção de fossas sépticas sem prévio estudo, o que pode causar uma contaminação do aquífero por matéria orgânica e/ou resíduos antrópicos.

O desenvolvimento de metodologias apropriadas ao estudo de aquíferos costeiros, conjuntamente a um banco de dados que reúna os resultados de diversos estudos nas áreas costeiras, possibilita um melhor entendimento do funcionamento dos aquíferos costeiros, de modo que a gestão dos recursos subterrâneos seja feita de maneira adequada. Neste sentido, o aquífero costeiro de Itaipuaçu foi avaliado com o emprego de métodos adequados e com o uso do banco de dados hidrogeoquímico que vem sendo construído pela própria equipe do Laboratório de Hidrogeologia – IGEO/UFRJ há mais de uma década (ALMEIDA & PERALTA TAPIA, 2009; ALMEIDA, 2009; SILVA JR. *et al.*, 2003; ALVES, 2000; CRISTO, 2012, dentre outros).

Para a investigação de sistemas hidrogeológicos, a hidrogeoquímica é uma ferramenta importante, pois é capaz de fornecer informações sobre o funcionamento de sistemas aquíferos, através de ferramentas que facilitam a compreensão das características químicas, relações hidrogeológicas entre as diversas unidades geológicas, além de prover dados relativos à qualidade da água subterrânea. A realização dessas análises das águas subterrâneas podem ser feitas *in situ*, ou em laboratório, e são essenciais para a caracterização hidrogeoquímica do aquífero.

O trabalho está estruturado em 06 capítulos. O presente capítulo traz a introdução e os objetivos dessa monografia. A área de estudo é apresentada no capítulo 02; nele são abordados a geologia regional, local e os aspectos fisiográficos, dando uma visão geral da área. O capítulo 03 trata das metodologias utilizadas para obtenção dos resultados que serão apresentados no capítulo posterior. No capítulo 4 apresentam-se os resultados do trabalho, com ênfase na caracterização hidrogeoquímica do aquífero costeiro de Itaipuaçu. Para finalizar, o capítulo 05 mostra as conclusões obtidas através da análise dos resultados. Ao final do trabalho, no capítulo 6, encontram-se as referências e a bibliografia utilizada e os sítios da web consultados para a confecção do presente estudo, também conta com um anexo onde está exposta a planilha de dados obtidos nas campanhas de campo.

1.2 Objetivos

Com o intuito de contribuir para o entendimento do comportamento do aquífero local, o presente trabalho busca, a partir da elaboração de modelo conceitual, gráficos e diagramas, caracterizar a hidrogeoquímica do aquífero de Itaipuaçu, visando avaliar a química da água aprofundando o conhecimento e a compreensão da área de estudo.

Como objetivo principal, tem-se a realização de modelagem hidrogeoquímica e a caracterização do aquífero costeiro de Itaipuaçu, visando à compreensão do modelo conceitual de funcionamento do sistema aquífero.

Para o progresso e andamento do estudo surgem os objetivos complementares que incluem:

- Gerar uma base dados hidroquímica que inclui o levantamento de dados químicos em poços, parâmetros *in situ*, e localização dos poços.
- Elaboração de diagramas (Piper, Stiff, Schoeller) para a classificação e representação hidroquímica das águas subterrâneas a partir de análises químicas dos elementos maiores.
- Confecção de mapas temáticos
- Análises e interpretações isotópicas.
- Utilização do software de especiação PHREEQCI 3.0. com o intuito de avaliar os processos hidrogeoquímicos responsáveis pela composição destas águas através da obtenção da especiação e índices de saturação dos minerais presentes.

2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

2.1 Localização

A área de estudo está situada no distrito de Itaipuaçu, município de Maricá, estado do Rio de Janeiro, localizado a aproximadamente 50 km da capital do estado. O principal acesso a esta localidade a partir da cidade do Rio de Janeiro se dá pela BR 101 Norte e posteriormente Rodovia Amaral Peixoto (RJ 106).

O município de Maricá faz parte da região designada como Região Metropolitana do Rio de Janeiro. A área estudada (Figura 1) possui cerca de 30 km², considerando-se o perímetro limitado a norte pela Pedra de Itaocaia, a leste pela Área de Proteção Ambiental (APA) de Maricá, a oeste pela Serra da Tiririca e a sul pelo Oceano Atlântico. No exercício numérico realizado por Eger (2012), em seu trabalho sobre a hidrodinâmica da área, a área considerada foi de 22,6 km², pois se desconsiderou a área denominada Recanto de Itaipuaçu e a faixa de praia (posterior ao canal de Itaipuaçu). Os mapas de isotores geoquímicos elaborados no trabalho de Cristo (2013) consideraram uma área de interpolação de 36 km², pois se incluiu terrenos da Aeronáutica a leste, onde havia dados geoquímicos.

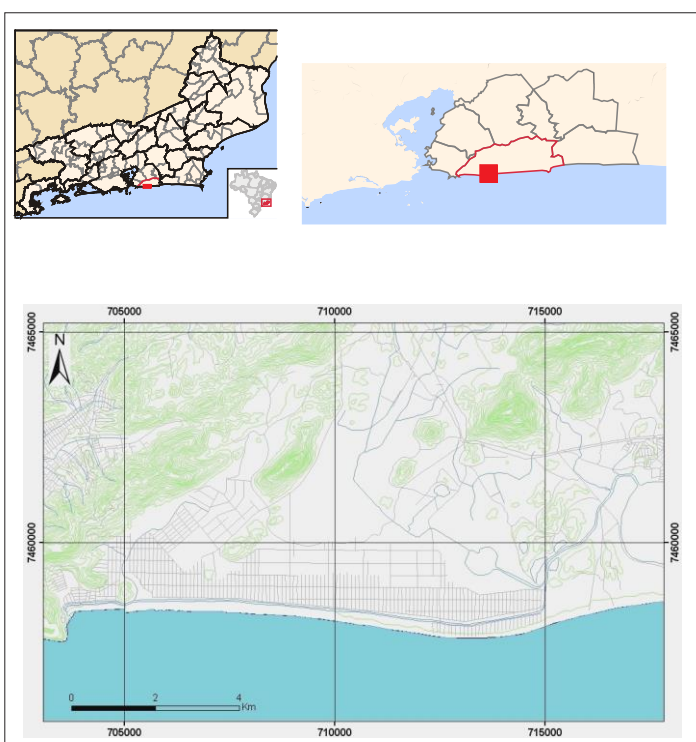


Figura 1 - Localização da área do estudo no distrito de Itaipuaçu, Maricá, com indicação dos pontos de cadastro de poços.

2.2 Geologia Regional

A área de estudo, faz parte de um complexo geológico representado por dois domínios tectonomagmáticos: o Domínio Serra do Mar e o Domínio Região dos Lagos, que constituem o embasamento geológico das unidades aquíferas consideradas na área de estudo (Figura 2).

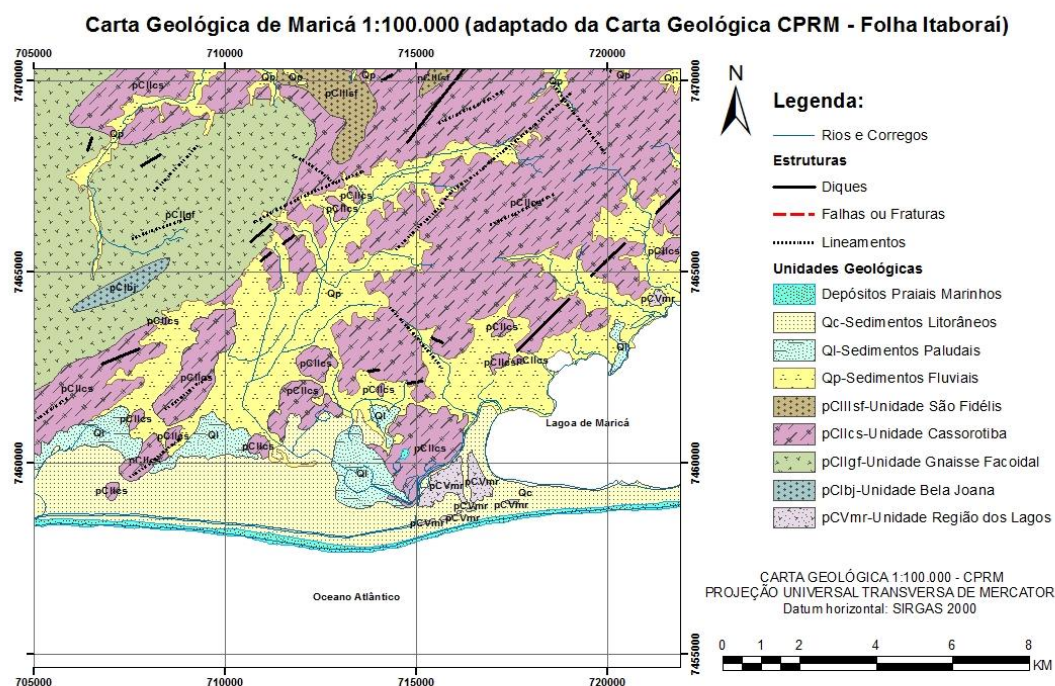


Figura 2 - Carta geológica de Maricá 1:100.000 (Eger, 2012).

O domínio Serra do Mar ocupa a praticamente toda a área de interesse do estudo, correspondendo geograficamente à microplaca Serra do Mar. É composto por uma sucessão de arcos magmáticos mostrando marcante polaridade temporal e composicional de W para E. O Domínio é caracterizado ainda por supracrustais que sofrem metamorfismo de baixa pressão e alta temperatura, na fácies anfibolito, com abundante fusão parcial *in situ* (Complexo Paraíba do Sul). Essa unidade está exposta ao longo de todo o domínio, o qual sofreu cavalgamento, com vergência de topo para NW, por parte das rochas que integram o domínio “Região dos Lagos” nos limites SE do domínio (CPRM, 2001).

O domínio Região dos Lagos situa-se na porção no extremo oriental da área de estudo. É constituído por ortognaisses paleoproterozóicos e supracrustais (Complexo Búzios)

interpretadas como remanescente de *back arc*. Foi metamorfizado na fácies anfibolito superior, em evento colisional com cavalgamento para NW, sobre o domínio Serra do Mar durante os estágios terminais da colagem brasileira, no Cambriano (CPRM, 2001).

Recobrimo as unidades do embasamento descritas nos parágrafos anteriores, ocorrem extensos arcos praias do Quaternário, associados a cordões litorâneos que ocorrem em forma de duplos cordões, dispostos paralelamente entre si e separados por uma depressão estreita. A evolução geológica dos cordões costeiros do litoral do estado do Rio de Janeiro pode ser explicada pelos diversos períodos de alternâncias entre climas secos e úmidos, e de avanços e recuos do nível do mar, que propiciaram a deposição de uma gama muito variável de sedimentos. A ascensão do nível dos mares, influenciada pelo degelo das calotas polares, marca a Transgressão Flandriana (14.000-7000 anos) que, no seu clímax, deu origem à formação da Baía de Guanabara e outras enseadas ao longo do litoral fluminense (*in*. ALVES, 2000).

2.3 Geologia Local

A planície costeira de Itaipuaçu é composta por uma sequência de dois sistemas lagunares isolados por cordões litorâneos arenosos, de idade pleistocênica e holocênica, respectivamente. Os cordões litorâneos formaram-se durante períodos de alternâncias entre climas secos e úmidos, e três ciclos transgressivos- regressivos nos últimos 7500 anos, cujo nível mais elevado ocorreu há 5100 anos A.P.(antes do presente). Em Itaipuaçu, a zona conhecida como “restinga interna” é formada por depósitos lagunares e seus cordões arenosos marinhos, cujas altitudes variam de 8 a 12 metros. Já a “restinga externa” ocorre entre a barreira interna e o oceano, e suas altitudes variam de 4 a 7 metros (TURCQ *et al.*, 1999).

Entre os depósitos da barreira interna e os depósitos continentais, nesta região são encontrados depósitos arenosos de granulometria mais fina quando comparado com os depósitos da barreira interna, provavelmente relacionado terraços de praias (beach-ridges) anteriores (PERRIN, 1984; TURCQ, 1986 apud TURCQ *et al.*, 1999). Esses depósitos possuem contatos bem definidos com as rochas aflorantes do Pré-Cambriano: Unidade Cassorotiba e Unidade Gnaisse Facoidal.

Segundo Muehe e Carvalho (1989) a planície costeira é composta por duplos cordões, a partir dos quais, em sua retaguarda, foram formados complexos lagunares que, possuem

uma tendência de aumento de espelho d'água em direção a leste. Isso ocorreu em função do gradual afastamento das áreas montanhosas da linha de costa, a formação das lagoas está relacionada à ocorrência de uma ligeira elevação do nível do mar no Holoceno inundando a depressão intracordões.

A formação e evolução geológica da planície costeira e seus cordões arenosos deu-se através do retrabalhamento de sedimentos, disponibilizados pela erosão do cristalino, durante períodos de transgressões e regressões marinhas (MUEHE, 1998). Essas oscilações no nível do mar ocorreram durante o Quaternário, cuja ascensão do nível dos mares foi influenciada pelo degelo das calotas polares, marcada pela Transgressão Flandriana (14.000 a 7000 anos A.P.) que, no seu clímax, deu origem à formação da Baía de Guanabara e outras enseadas ao longo do litoral fluminense (*in* ALVES, 2000).

2.4 Hidrogeologia

A área de estudo é caracterizada por um sistema com materiais sedimentares, do tipo granular, constituídos por depósitos aluvionares costeiros, por vezes porções de solo e rocha alterada. Os depósitos aluvionares são compostos principalmente por areias quartzosas e, subordinadamente, por areias siltosas e argilosas, que ocorrem nas proximidades das lagunas decorrentes da formação das baixadas litorâneas durante os últimos movimentos de variações do nível do mar (Almeida, 2009).

Em Itaipuaçu, o domínio hidrogeológico foi reconhecido como um sistema com aquíferos sedimentares granulares, que compreendem depósitos marinhos, eólicos e aluvionares costeiros heterogêneos e porções de solo e rocha alterada. Esses sedimentos aluvionares são compostos predominantemente por areias quartzosas, localmente com camadas siltosas e argilosas, que ocorrem nas proximidades das lagunas, decorrentes da formação da baixada litorânea durante os últimos movimentos de transgressão e regressão no Holoceno, entre 5000 e 7000 anos atrás. Disposta paralelamente à linha de costa foi formada a baixada litorânea, com vegetação rasteira e altos arenosos (PEREIRA *et al.*, 2003; ALMEIDA e SILVA JR., 2007).

Na área de estudo o nível d'água do aquífero livre é raso, variando em média de 2 a 8 m de profundidade e a água subterrânea local tem uma qualidade química bastante variada.

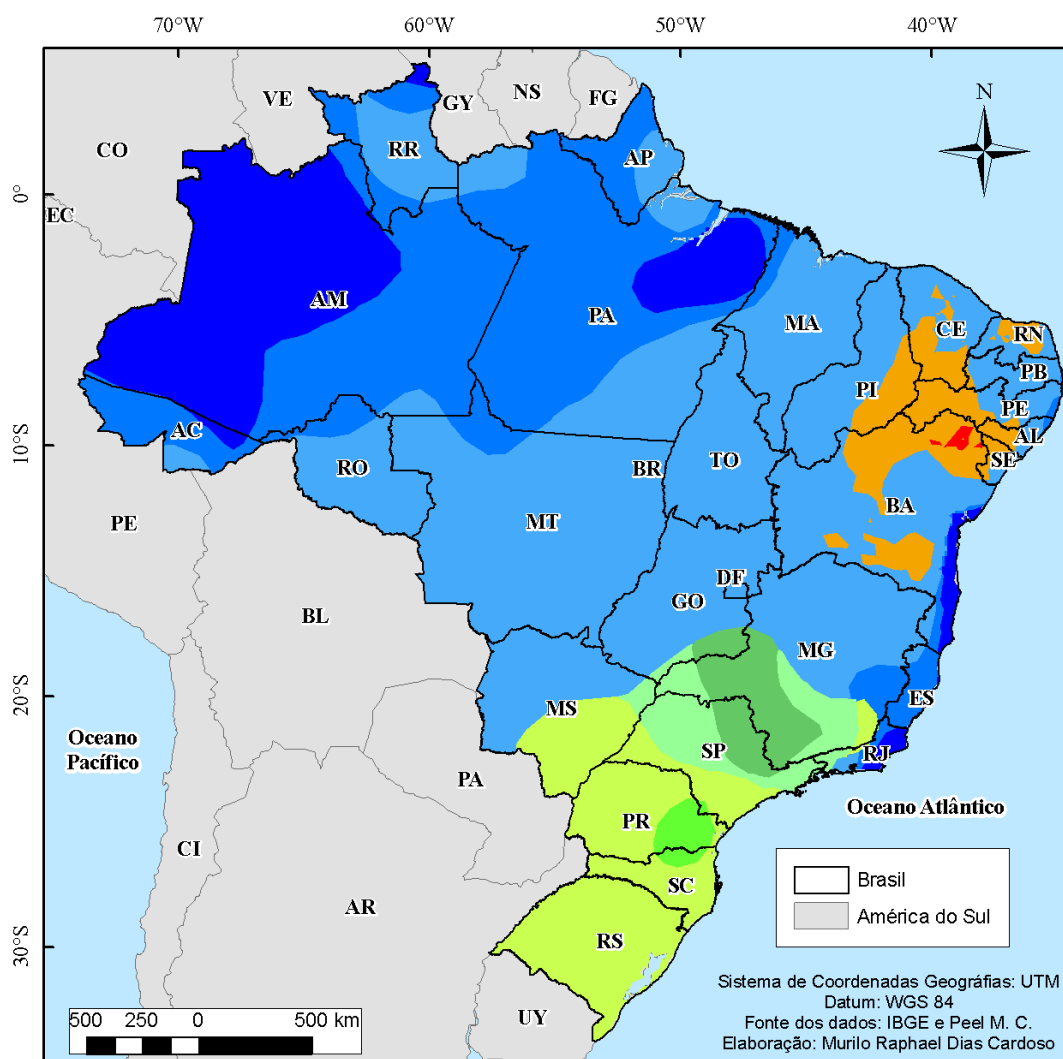
Os poços existentes na área têm em média profundidades de 12 metros, estando esses inseridos no aquífero livre superficial. Porém após o canal, próximo à praia, esse aquífero não apresenta boa qualidade, pois sua água possui elevada salinidade e forte cheiro de compostos de enxofre. Neste perímetro foi localizado um poço com cerca de 40 metros de profundidade. Este poço, apesar de sua profundidade e proximidade com o mar, possui uma água de boa qualidade química. Pelos dados estratigráficos e hidrogeológicos locais, este aquífero corresponde a uma unidade confinada subjacente ao aquífero mais superficial, o aquífero profundo. Na área estudada, fatores estratigráficos e estruturais condicionam a distribuição da salinidade das águas subterrâneas.

O distrito de Itaipuaçu começou a receber recursos públicos para a instalação de um sistema de abastecimento público da área, presentemente em execução (Agosto de 2013). Contudo, esse sistema não vem acompanhado de um sistema de coleta de esgoto. Acredita-se que o aquífero ainda será usado pela população do local por muitos anos até que todo o distrito seja abastecido completamente pela concessionária de água, sofrendo com os potenciais riscos de contaminações antrópicas provocadas pelas fossas sépticas instaladas nos domicílios, exploração excessiva e infiltração de águas superficiais contaminadas.

O aquífero livre da área estudada, devido a pouca profundidade do nível d'água nos cordões arenosos, torna-se mais raso na medida em que se aproxima do oceano e das lagunas onde chega a atingir apenas 1 m. Tais características, principalmente nos aluviões, conferem aos aquíferos livres alta susceptibilidade à contaminação bacteriológica (CRUZ e SILVA JR., 2006).

2.5 **Clima**

De uma maneira geral, o clima na região é predominantemente quente e úmido, com estação seca pouco pronunciada e com mais de 1300 mm anuais de precipitação (CIDE, 1998). De acordo com a classificação de Köppen (1948) o clima da região é classificado como Aw – clima tropical úmido com inverno seco (figura 3).



Classificação Climática: Köppen

Af - Clima tropical úmido ou Clima Equatorial	Cfa - Clima temperado úmido com Verão quente
Am - Clima de monção	Cfb - Clima temperado úmido com Verão temperado
Aw - Clima Tropical com Estação seca no inverno	Cwa - Clima temperado úmido com Inverno seco e Verão quente
BSh - Clima das estepes quentes de baixa latitude e altitude	Cwb - Clima temperado úmido com Inverno seco e Verão temperado
BWh - Clima das regiões desérticas quentes de baixa latitude e altitude	

Figura 3 - Mapa da classificação climática de Köppen do Brasil – Fonte:
<http://murilocardoso.com/2012/01/20/mapas-classificacao-climatica-de-koppen-do-mundo-e-do-brasil/>

A tabela 1 a seguir ilustra a variação climática média dos últimos 10 anos da área estudada. Observa-se que a variação média das temperaturas máxima e mínima ao longo do ano é pequena, a média da umidade relativa do ar é de 80% e a precipitação média é de 1349 mm/ano, para a média dos últimos 10 anos (2003-2012).

Tabela 1 Dados climáticos de Maricá – RJ

Dados climáticos – Maricá												
Meses	jan	fev	mar	Abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	Dez
Temperatura máxima média (°C)	31,1	31,6	30,3	29,3	26,8	26,1	26	26,4	26,7	27,6	28,5	28,6
Temperatura mínima média (°C)	22,7	22,6	22,1	20,8	17,9	16,4	15,9	16,7	17,5	19,3	20,5	21,9
Temperatura média mensal (°C)	26,9	27,1	26,2	25,05	22,35	21,25	20,95	21,55	22,1	23,45	24,5	25,25
Umidade relativa do ar (%)	81	77	80	82	81	82	80	79	78	80	79	82
Número de dias com chuva	13	9	11	8	9	7	8	7	9	11	13	13
Precipitação mensal total (mm)	150	111	148	140	95	65	99	37	69	124	141	170
Notas:	1. A temperatura mínima chega a 11°C nos meses de maio a julho.											
	2. Média dos últimos 10 anos.											
Fonte:	INMET											

Os ventos possuem direções variadas: NE (estável), S/SE (frente fria) e N/NW (chuvas de verão) conforme pode ser observado na figura 3. A distribuição dos percentuais desses ventos está diretamente associada a distribuição das massas de ar dominantes no litoral brasileiro. Nos meses de verão o fortalecimento da Alta Pressão do Atlântico Sul favorece o predomínio de ventos de NE. O aumento da frequência de ventos de Sul e Sudoeste nos meses de inverno está associado a passagens sistemáticas de frentes frias, mais comuns nesta época do ano (ALMEIDA, 2009).

3 METODOLOGIA

Por ser uma área bastante estudada, foram realizadas apenas algumas campanhas de campo para complementar o levantamento de dados hidrogeológicos e cadastramento de novos poços d'água. Ao total foram cadastrados 57 pontos de água subterrânea e superficial, onde em todos foram realizadas medições *in situ*, com 27 amostras coletadas para análises físico-químicas e 6 amostras para isotopia.

A metodologia empregada neste trabalho pode ser dividida segundo a estruturação dos subitens apresentados a seguir:

- Campanhas de campo para levantamento de dados complementares: nesta etapa foi possível realizar medições *in situ* e coletar amostras de água para análises físico-químicas e isotópicas.
- Elaboração de tabelas, mapas e gráficos: esta etapa incluiu a elaboração de mapas, gráficos e tabelas com a finalidade de facilitar a observação dos dados e obtenção de resultados.
- Interpretação dos dados coletados e obtenção de resultados para a interpretação da fenomenologia local, com elaboração do modelo conceitual do aquífero de Itaipuaçu.

3.1 Levantamento de Dados

Objetivando o melhor entendimento da área, a localização dos poços foi estrategicamente escolhida de forma que abrangesse toda a área. O levantamento de dados engloba três distintas fases desse trabalho.

3.1.1 Levantamento de dados pré-existent

Esta etapa é composta por trabalhos anteriormente realizados na área pelo laboratório de Hidrogeologia - UFRJ organizados em base de dados do Laboratório de Hidrogeologia da UFRJ, no âmbito dos projetos ACOST-RIO e Hidroq-Rio (FAPERJ), além de documentos, mapas (geológicos e topográficos) e perfis realizados em pesquisas de outros órgãos governamentais (ex. IBGE, INMET, ANA), armazenados no laboratório.

Iniciou-se o trabalho pela revisão bibliográfica dos trabalhos anteriormente produzidos e por pesquisa de documentos disponíveis em diversos meios de pesquisa existentes e em seguida foi possível criar um novo banco de dados para utilização específica na pesquisa. A base de dados serviu como base à caracterização hidrogeológica da área de estudo, um dos objetivos da pesquisa.

3.1.2 Campanhas de campo

Objetivando aumentar a malha de dados já existente, as campanhas de campo foram necessárias para o cadastrando dos novos poços (todos os poços já existiam anteriormente ao trabalho, pertencendo aos moradores do local), incluindo a amostragem de água.

Durante as campanhas de campo foram coletadas 57 amostras, e em todas as amostras foi possível medir parâmetros *in situ* realizadas através dos aparelhos HANNA HI-98120, HI-98128, HI-98311, que avaliam os parâmetros físico-químicos (Condutividade Elétrica, Potencial Óxi-redox e pH, respectivamente); além de coleta de 27 amostras para análises físico-químicas realizadas no LabÁguas da PUC-Rio e 6 amostras para análise isotópica realizadas no laboratório HYDROISOTOP GmbH, Alemanha.

3.1.3 Preparação da base de dados

A organização dos dados foi feita em tabelas utilizando o programa *Microsoft Excel*® contendo os resultados como dados de campo, parâmetros físico-químicos, localização geográfica, entre outros, gerados através dos levantamentos preliminares, de campo e análises laboratoriais de todos os poços.

A partir dessas tabelas, com todos os dados organizados, e a base de dados estruturada, verificaram-se os principais parâmetros para o estudo assim como a necessidade de complementação de novos dados.

3.2 Caracterização e Interpretação Geoquímica

Com as análises químicas completas, realizadas a partir das amostras coletadas em campo durante a fase de coleta, os dados puderam ser exportados para softwares especializados onde foi possível manusear os dados e obter diagramas, mapas, modelos hidroquímicos, que são ferramentas úteis para a compreensão do aquífero. Os utilizados os programas computacionais: *AquaChem*® (Aqueous Geochemical Data Analysis and Plotting, versão 5.1, da Waterloo Hydrogeologic) para elaboração de gráficos e diagramas; *Microsoft Excel*® para calcular as razões iônicas; *Software Grapher 8.0* para elaborar os gráficos das razões iônicas e isotopia e *Software ArcGis* para a elaboração dos mapas.

A seguir serão descritos as etapas de caracterização e interpretação geoquímica aplicadas no trabalho.

3.2.1 Diagramas Hidroquímicos

Com a finalidade de visualizar e compreender melhor os dados gerados, os diagramas são ferramentas úteis para a interpretação dos dados obtidos nas coletas de campo. O *software AquaChem*® (Aqueous Geochemical Data Analysis and Plotting, versão 5.1, da Waterloo Hydrogeologic) permitiu a análise da qualidade da água. A seguir são descritos os três diagramas utilizados nesse trabalho.

3.2.1.1 Diagrama de Piper

“O diagrama de *Piper* é utilizado frequentemente quando se trabalha com grande número de análises químicas de água, servindo para classificar e comparar os distintos grupos de águas quanto aos íons dominantes” (FEITOSA, 2008).

Para plotar e interpretar o gráfico é necessário que os íons maiores (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} , HCO_3^-) estejam em porcentagem, pois cada vértice do gráfico corresponde a 100% de um íon conforme apresentado na figura 4.

O diagrama de *Piper* é composto por dois diagramas triangulares, onde um representa os cátions e outro os ânions e o terceiro diagrama (diamante) é a projeção dos pontos onde se permite definir a fácies hidrogeoquímica das amostras.

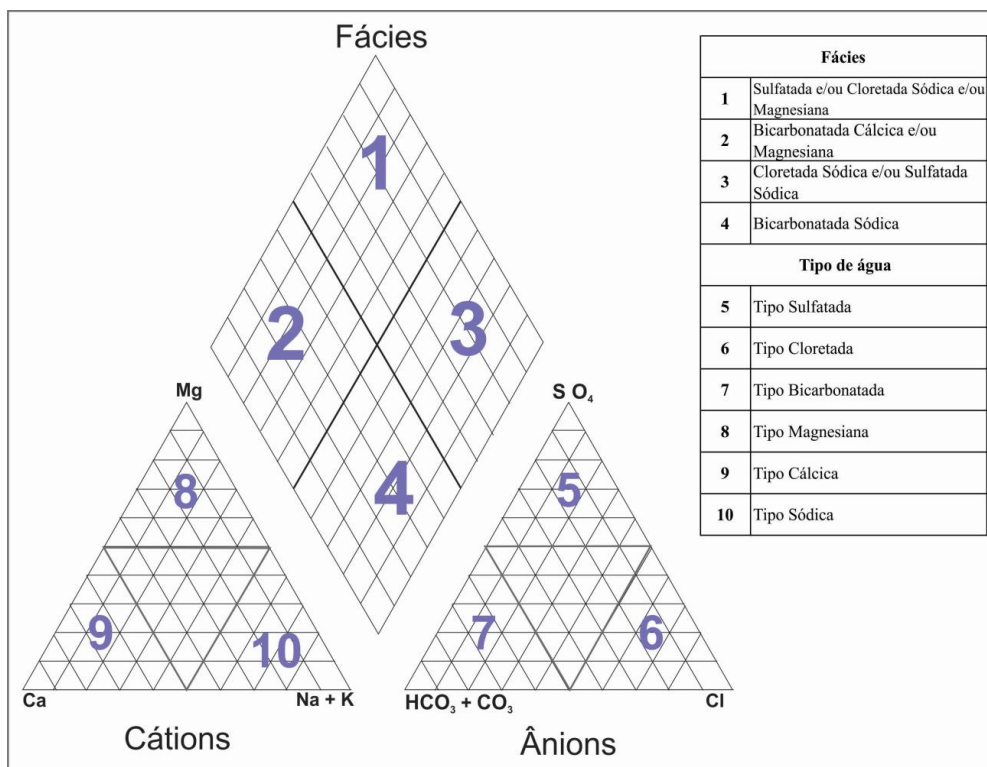


Figura 4 - Diagrama de Piper e caracterização faciológica da água subterrânea pelos íons maiores.

3.2.1.2 Diagrama de Stiff

Nessa representação gráfica todas as concentrações iônicas em meq/L ou % meq/L são representadas sobre linhas paralelas horizontais. Ligando os pontos respectivos obtém-se uma figura geométrica característica para a água analisada (FEITOSA, 2008).

O diagrama de Stiff (Figura 5) permite representar apenas uma amostra por vez, sendo útil para análises de dados distribuídos espacialmente. Essa distribuição espacial é bastante útil quando utilizadas para apresentar em mapas as amostras, facilitando o reconhecimento de águas semelhantes em uma área de estudo.

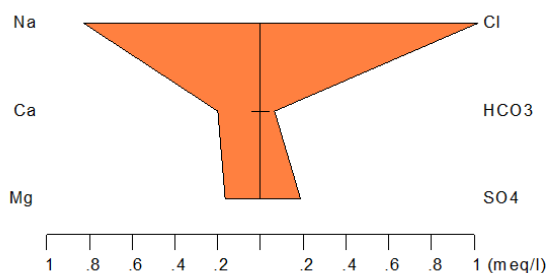


Figura 5 - Exemplo de Diagrama de Stiff.

3.2.1.3 Diagrama logarítmico de Schoeller

As concentrações em meq/L da amostra são plotadas numa escala logarítmica. Esta forma de apresentação dos dados hidroquímicos (Figura 6) é bastante flexível e permite aumentar ou reduzir o número de elementos representados, de acordo com as necessidades e os objetivos da interpretação. (FEITOSA, 2008).

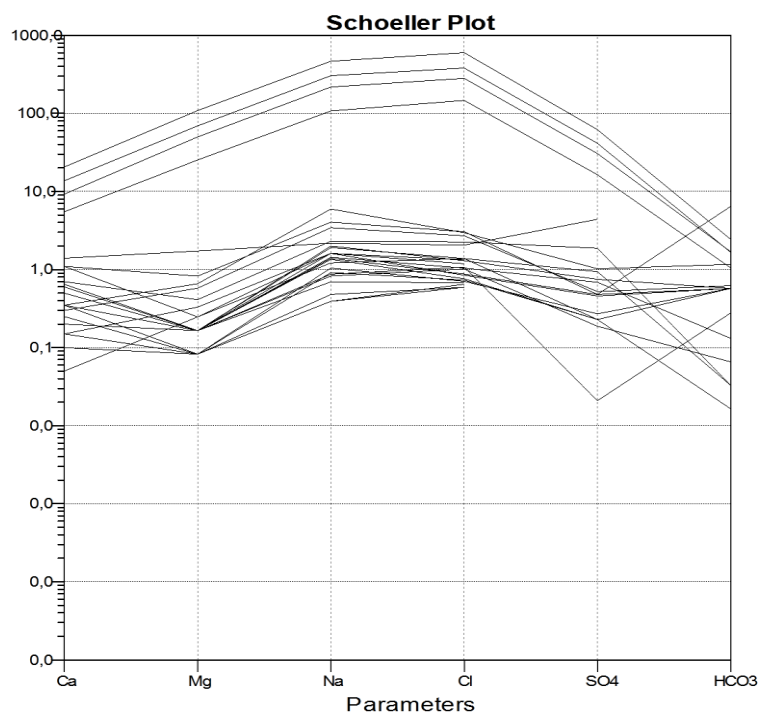


Figura 6 - Exemplo de Diagrama de Schoeller.

3.2.2 Razões Iônicas

As razões iônicas são as relações entre os íons dissolvidos em água. Estas relações podem indicar interação com o litotipo do qual a água se origina, indicar a ação de fenômenos modificadores ou indicar uma característica específica da água. Podem-se estabelecer vários tipos de razões cujo objetivo é função do problema a estudar (Santos, 2000).

O estudo das razões iônicas tem sido frequentemente utilizado para melhor caracterização dos aquíferos, sendo uma ferramenta amplamente utilizada para auxiliar o estudo e compreensão da dinâmica das águas subterrâneas, com a avaliação das relações entre os íons presentes. É de suma importância para classificação e interpretação da hidrogeoquímica dos aquíferos, principalmente quando se trata de

aquíferos costeiros. No distrito de Itaipuaçu foram escolhidas as razões iônicas de maior significado para a representação das condições hidrogeológicas locais.

Para o cálculo das razões iônicas é necessário que as concentrações estejam expressadas em miliequivalentes por litro (meq/L). O cálculo de conversão de miligramas por litro (mg/L) para meq/L dá-se através da expressão a seguir:

$$\text{miliequivalente} \left(\frac{\text{meq}}{\text{L}} \right) = \frac{\text{miligrama por litro (mg/L)}}{\text{peso atômico (mol)}} \times \text{Valência do elemento}$$

Equação 1 - Equação de conversão mg/L para meq/L

As razões de utilização mais frequente no presente estudo hidrogeoquímico serão descritas na Tabela 2.

3.2.3 Mapas hidrogeoquímicos da área de estudo

Para melhor visualização espacial dos dados obtidos através das coletas de campo, os pontos onde foram realizadas as mensurações *in situ* e as análises químicas em laboratório foram interpolados em ambiente SIG, utilizando o *software ArcGis/ArcMap®* (versão 9.3). Esta ferramenta permitiu a realização de uma avaliação dos dados quanto à distribuição, sendo possível assim gerar mapas com a localização de todos os pontos de coleta e mapas de isovalores de condutividade elétrica, pH e mapas das anomalias da qualidade da água para uma melhor visualização espacial dos resultados. Em seguida foram realizadas as interpretações consequentes a estes mapas.

Tabela 2 - Tabela descritiva das razões iônicas (Modificado de FEITOSA, 2008)

Razão	Descrição
rMg^{+2}/rCa^{+2}	<p>A água do mar tem razão rMg^{+2}/rCa^{+2} em torno de 5 e, por isso, as águas que circulam em litologias de origem marinha ou que tenham sofrido mistura com a água do mar têm também esta razão elevada. O aumento do conteúdo de cloretos e da razão rMg^{+2}/rCa^{+2} pode ser um bom indício de contaminação por água de origem marinha.</p> <p>Nas águas continentais, esta razão varia entre 0,3 e 1,5. Os valores próximos de 1 indicam uma provável influência de terrenos dolomíticos ou com serpentina, e valores superiores a 1 sugerem, em geral, relações com litotipos ricos em silicatos magnesianos, como gabros e basaltos. Entretanto, quando ocorre precipitação de $CaCO_3$ em uma água, aumenta a razão rMg^{+2}/rCa^{+2} sem que seja indicação dos litotipos atravessados. No caso da dissolução do calcário, ocorre uma diminuição desta razão.</p>
$rCl/rHCO_3^-$	<p>A razão $rCl/rHCO_3^-$ é muito útil para caracterizar a intrusão marinha, já que as águas continentais têm normalmente valores entre 0,1 e 5 e na água do mar os valores variam entre 20 e 50. Como o conteúdo em HCO_3^- é relativamente constante nas águas subterrâneas, esta razão é muito útil para seguir o processo de concentração de sais no sentido do fluxo subterrâneo.</p> <p>Se o aumento de cloretos é devido à concentração de sais nas zonas de recarga, a razão $rCl/rHCO_3^-$ cresce bem menos para igual aumento de cloretos quando ocorre uma intrusão marinha.</p>
rCl/rBr^-	<p>De acordo com a razão Cl/Br podem ser obtidas informações sobre a fonte de salinização: a água do mar possui aproximadamente $rCl/rBr = 655 \pm 4$.</p> <p>A razão Cl/Br pode ser usada como um traçador confiável, devido ao fato de que o Cl e Br serem conservativos (isto é, não reagem com a matriz do aquífero), exceto na presença de quantidade muito grande de matéria orgânica.</p>
rNa^+/rCl^-	<p>Para água do mar a razão varia geralmente entre 0,87 e 0,89. O valor para água doce é uma função do processo químico durante a recarga, mas geralmente é $1,0 \pm 0,1$. Quando a água salina desloca a água, a razão alcalinos/cloreto diminui com relação aos valores da água doce e frequentemente alcançam valores mais baixos que águas marinhas.</p>

3.2.4 Emprego do Programa *PhreeqcI*

De modo a entender os processos geoquímicos que decorrem da interação da água subterrânea circulante e os minerais da matriz geológica, que tendem a controlar a presença e concentração dos íons dissolvidos em solução, responsáveis pela qualidade das águas subterrâneas, foi utilizado o programa PHREEQCI Interactive 3.0 - *PhreeqcI*, desenvolvido pelo USGS (Parkhurst e Appelo, 2005) para realizar a especiação e o cálculo dos índices de saturação para os respectivos minerais da base de dados.

O *software PhreeqcI* executa uma variedade de cálculos hidrogeoquímicos e possui uma interface gráfica em ambiente Windows, o que facilita sua utilização. O fundamento do *PhreeqcI* é o modelo de associações iônicas em meio aquoso e ele é capaz de realizar tarefas como: cálculo de especiação e índices de saturação; cálculos de transporte advectivo e de evolução geoquímica em tubos de fluxo, incluindo mesclas, reações irreversíveis, equilíbrios gasosos e minerais, trocas iônicas e reações de complexação em superfície; modelagem inversa, na qual se calculam as transferências minerais e de gases que respondem às diferenças entre as águas, considerando algumas restrições (Cruz e Silva Jr., 2006).

O *PhreeqcI* pode ser usado como um programa de especiação para calcular índices de saturação e distribuição de espécies aquosas que são parâmetros convenientes para a avaliação e proximidade do equilíbrio de várias reações de solubilidade para sistemas aquosos. Calcula-se o índice de saturação de uma determinada espécie utilizando a equação abaixo.

$$SI = \log_{10} \left(\frac{IAP}{K_{sp}} \right)$$

Equação 2 - Equação do índice de saturação de fases minerais em solução.

Onde:

SI é o índice de saturação; *IAP* é o produto da atividade iônica; e *K_{sp}* é a constante do produto de solubilidade do mineral. A tabela 3 descreve os valores para os índices de saturação.

Tabela 3 - Tabela descritiva dos Índices de Saturação

$SI = 0$	A fase mineral está em equilíbrio com a solução. Esta fase está presente na solução.
$SI < 0$	A fase mineral está insaturada em seus componentes na solução. Esta fase não existe ou seus componentes estão presentes como outra fase mineral ou estão adsorvidos por alguma superfície de troca.
$SI > 0$	A fase mineral está supersaturada em relação a solução. A fase mineral tenderá ao equilíbrio com a constante precipitação desta mesma na solução, o que depende da taxa de reação de cada mineral

3.2.5 Isotopia

A análise isotópica tem sido utilizada em estudos hidrogeológicos com o intuito de contribuir com a investigação dos aquíferos, reconhecendo a origem das águas subterrâneas, processos de salinização, datação de sistemas hídricos, definição de áreas de recarga, identificação de mistura entre unidades aquíferas, entre outras características (SILVA, 2012).

Para a compreensão da evolução da água da formação, sua diluição ou concentração por mistura com águas de diferentes salinidades e as condições climáticas a que estiveram submetidas, estuda-se a relação entre traçadores estáveis, como por exemplo os isótopos oxigênio-18 (^{18}O) e deutério (^2H). Os traçadores ambientais (ou naturais) são aqueles que ocorrem naturalmente no ciclo hidrológico. Entre os traçadores ambientais estão os isótopos dos átomos constituintes da molécula da água, como ^{18}O e ^2H .

Os isótopos ambientais estáveis são medidos sob a forma da razão entre os dois isótopos mais abundantes de um dado elemento. A utilização das espécies isotópicas estáveis faz-se sob a forma de diferenças relativas, isto é, através da razão entre a espécie isotópica mais pesada e a mais leve e mais abundante, comparada relativamente a um padrão específico, sendo os resultados expressos em notação relativamente a um padrão internacional.

O valor é adimensional, expresso em permilagem (‰) e definido pela expressão seguinte:

$$\delta_{(‰)} = \left[\frac{R_{amostra}}{R_{padrão}} - 1 \right] \times 1000$$

Equação 3 - Equação da razão isotópica de isótopos estáveis.

Onde:

$R_{amostra}$ - razão isotópica entre as concentrações das espécies de interesse na amostra ($^2\text{H}/^1\text{H}$, $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ou $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$).

$R_{padrão}$ - corresponde à mesma razão isotópica no padrão ($^2\text{H}/^1\text{H}$, $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ou $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$).

Valores δ positivos correspondem a amostras enriquecidas, com concentrações superiores à do padrão internacional.

Valores δ negativos correspondem a amostras isotopicamente empobrecidas, com concentrações inferiores à do padrão internacional.

O conceito da Reta Meteórica Mundial (Global Meteoric Water Line - GMWL) foi definido por Craig (1961), que publicou um diagrama de relação linear entre a concentração em $\delta^{18}\text{O}$ e em $\delta^2\text{H}$, baseado em aproximadamente 400 amostras de água de rios, lagos, e águas de precipitação de diversos países.

Os dados obtidos distribuem-se ao longo de um alinhamento definido pela equação,

$$\delta^2\text{H} = 8 \delta^{18}\text{O} + 10$$

Equação 4 - Equação da reta meteórica mundial (Craig, 1961).

Esta reta define a relação da composição isotópica das águas meteóricas em todo o mundo. Amostras de água que não tenham sido sujeitas a evaporação significativa quando projetadas são coincidentes com a GMWL. No entanto, águas que tenham sofrido evaporação considerável ou participado em outros processos como hidrólise de silicatos, interação com carbonatos e outros irão desviar-se da GMWL.

Com base nas informações isotópicas obtidas é possível compreender o funcionamento hidrogeológico de sistemas aquíferos naturais, como por exemplo, o tempo de

permanência da água no aquífero e a distância ao mar e altitude média das áreas de recarga (Silva 2012).

Neste trabalho, a metodologia consistiu na coleta de água subterrânea para análise isotópica em seis poços selecionados a partir do cadastro de poços existentes e posterior envio para laboratório especializado (HYDROISOTOP GmbH, Alemanha). Em todos os poços foram realizadas análises para oxigênio-18 e deutério. Utilizaram-se frascos de polietileno de 100 mL para coletar as amostra de oxigênio-18 e deutério. Os métodos empregados para analisar os compostos são descritos a seguir conforme Cristo (2013).

3.2.5.1 Oxigênio-18 ($\delta^{18}O-H_2O$)

A determinação de razão isotópica de oxigênio foi feita pela análise de CO_2 equilibrada com amostra de água pelo método de dupla entrada. O gás equilibrado foi analisado em um espectrômetro de massas de razões isotópicas Finigan MAT 250 e 251 (IRMS). A precisão da medição com base na análise repetida de água do padrão interno é $\pm 0,15$ ‰.

Os resultados são relatados como o desvio-padrão relativo da razão isotópica ($^{18}O/^{16}O$) com relação ao padrão internacional "Vienna Standard Mean Ocean Water" (V-SMOW).

3.2.5.2 Deutério (δ^2H-H_2O)

Para a determinação da razão isotópica de hidrogênio ($^2H/^1H$) o método de redução foi usado. A análise da razão isotópica foi executada utilizando-se o método de entrada dupla em múltiplas amostras. Para a análise através do método automatizado, 3 mL de amostra foram pipetados em reatores ligados a um sistema *on-line* automatizado e equilibrado com H_2 . Uma vareta de grafite encamisada em platina foi usada como catalisador para o equilíbrio de H_2 com água. O gás equilibrado foi analisado em um espectrômetro de massa de razões isotópicas Finigan MAT 251 ratio (IRMS). A precisão da medição com base na análise repetida de água padrão interno é de $\pm 1,5$ ‰. Os resultados são relatados como o desvio-padrão relativo da razão isotópica ($^2H/^1H$) para o padrão internacional "Vienna Standard Mean Ocean Water" (V-SMOW).

3.2.6 Qualidade da Água Subterrânea.

O conceito de qualidade da água relaciona-se ao uso e características da água, determinadas pelas substâncias nela contida, utilizando os parâmetros físico-químicos e microbiológicos para determinar a qualidade. Para cada uso da água existe uma correspondência de qualidade e quantidade. O padrão de potabilidade da água é dado por um conjunto de parâmetros que lhe conferem qualidade própria para o uso a que se destina (CONAMA, 2008).

Neste trabalho utilizaram-se como indicadores de qualidade da água apenas os parâmetros físico-químicos coletados nas campanhas de campo, para fundamentar os resultados os padrões utilizados para comparação foram retirados da Portaria MS Nº 2914 DE 12/12/2011 e a RESOLUÇÃO Nº 396 CONAMA, DE 03 DE ABRIL DE 2008.

3.2.6.1 Cálculo do erro cometido em análises físico-químicas.

O cálculo do erro cometido é de suma importância para dar segurança aos resultados hidroquímicos, pois permite avaliar a confiabilidade dos dados obtidos. Numa análise hidroquímica balanceada os valores das concentrações de cátions e ânions devem ser aproximados.

O coeficiente de erro é o desvio percentual da diferença entre os íons e pode ser calculado através da fórmula a seguir, considerando um valor igual ou inferior a 10% sendo um erro aceitável.

$$e\% = \left[\frac{r\sum p - r\sum n}{r\sum p + \sum n} \right] \times 100$$

Equação 5 - Cálculo do erro de análise química em amostras de água.

Onde: e – erro de análise;

$r\sum p$ – concentração total de cátions; e

$r\sum n$ – concentração total de ânions.

3.2.6.2 Padrão da Qualidade da Água.

A Resolução 396/2008 (CONAMA, 2008) dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais das águas subterrâneas e define o padrão de qualidade como o valor limite

adotado como requisito normativo de um parâmetro de qualidade de água, estabelecido com base nos valores de referência de qualidade e nos valores máximos permitidos para cada um dos usos preponderantes. O parâmetro de qualidade da água são substâncias ou outros indicadores representativos da qualidade da água. Os usos preponderantes como os principais usos das águas subterrâneas que incluem: consumo humano, dessedentação de animais, irrigação e recreação; o Valor de Referência de Qualidade (VRQ) é a concentração ou valor de um dado parâmetro que define a qualidade natural da água subterrânea; o Limite de Quantificação Praticável (LQP) é a menor concentração de uma substância que pode ser determinada quantitativamente com precisão e exatidão, pelo método utilizado e o Valor Máximo Permitido (VMP) como sendo o limite máximo permitido de um dado parâmetro, específico para cada uso da água subterrânea.

A Tabela 4, adaptada da resolução acima citada, apresenta a lista dos parâmetros de maior ocorrência em águas subterrâneas e seus respectivos VMPs.

Tabela 4 - Tabela para VPMs dos Íons presentes na água segundo a Resolução 396/2008 (CONAMA).

Parâmetros Inorgânicos	Usos Preponderantes da Água			
	Consumo Humano	Dessedentação de Animais	Irrigação	Recreação
	<i>Valores em mg/L</i>			
Alumínio (Al)	0,2	5	5	0,2
Antimônio (Sb)	0,005	ND	ND	ND
Arsênio (As)	0,01	0,2	ND	0,05
Bário (Ba)	0,7	ND	ND	1
Berílio (Be)	0,004	0,1	0,1	ND
Boro (B)	0,5	5	0,5	1
Cádmio (Cd)	0,005	0,05	0,01	0,005
Chumbo (Pb)	0,01	0,1	5	0,05
Cianeto (CN)	0,07	ND	ND	0,1
Cloreto (Cl)	250	ND	100 - 700	400
Cobalto (Co)	ND	1	0,05	ND
Cobre (Cu)	2	0,5	0,2	1
Crômio (Cr)	0,05	1	0,1	0,05
Ferro (Fe)	0,3	ND	5	0,3
Fluoreto (Fe)	1,5	2,0	1	ND
Lítio (Li)	ND	ND	2,5	ND
Manganês (Mn)	0,1	0,05	0,2	0,1
Mercúrio (Hg)	0,001	0,01	0,002	0,001

Parâmetros Inorgânicos	Usos Preponderantes da Água			
	Consumo Humano	Dessedentação de Animais	Irrigação	Recreação
	<i>Valores em mg/L</i>			
Molibdênio (Mo)	0,07	0,15	0,01	ND
Níquel (Ni)	0,02	1	0,2	0,1
Nitrato (NO ₃)	10	90	ND	10
Nitrito (NO ₂)	1	10	1	1
Selênio (Se)	0,01	0,05	0,02	0,01
Sódio (Na)	200	ND	ND	300
Sólidos Totais dissolvidos (STD)	1.000	ND	ND	ND
Sulfato (SO ₄)	250	1.000	ND	400
Vanádio (V)	0,05	0,1	0,1	ND
Zinco (Zn)	5	24	2	5

A Portaria 2914/2011 do Ministério da Saúde dispõe sobre os procedimentos de controle e vigilância da qualidade da água e padrão de potabilidade para consumo humano. As tabelas 5, 6 e 7 apresentam os VMPs para substâncias que apresentam risco à saúde presentes na água, para o padrão organoléptico e para os parâmetros físico-químicos, respectivamente.

Tabela 5 - VMPs para substâncias que apresentam risco à saúde, segundo a Portaria 2914/2011 Anvisa-MS.

Parâmetros Inorgânicos	VMP (mg/L)
Antimônio (Sb)	0,005
Arsênio (As)	0,01
Bário (Ba)	0,7
Cádmio (Cd)	0,005
Chumbo (Pb)	0,01
Cianeto (CN)	0,07
Cobre (Cu)	2
Crômio (Cr)	0,05
Fluoreto (Fe)	1,5
Mercúrio (Hg)	0,001
Níquel (Ni)	0,07
Nitrato (NO ₃)	10
Nitrito (NO ₂)	1
Selênio (Se)	0,01

Tabela 6 VMP para padrão organoléptico de potabilidade, segundo a Portaria 2914/2011 Anvisa-MS.

Parâmetros Inorgânicos	VMP (mg/L)
Alumínio (Al)	0,2
Cloreto (Cl)	250
Ferro (Fe)	0,3
Manganês (Mn)	0,1
Sódio (Na)	200
Sulfato (SO ₄)	250
Zinco (Zn)	5

Tabela 7 VMP para os parâmetros físico-químicos, segundo a Portaria 2914/2011 Anvisa-MS.

Parâmetros Físico-químicos	Unidade	VMP
Sólidos Totais dissolvidos (STD)	mg/L	1000
Cor Aparente	uH	15
Dureza Total	mg/L	500
Turbidez	uT	5
pH		6,0 - 9,5

3.2.6.3 *Risco Salino.*

Visando complementar o estudo da qualidade da água da área de estudo e avaliar a salinidade do aquífero tendo em vista a proximidade do aquífero com o mar e a exploração excessiva, utilizou-se para essa estimativa a Razão de Adsorção de Sódio – RAS. Embora seja utilizada para irrigação, foram utilizados os elementos para inferir a qualidade para o consumo humano e a categoria da classificação da água segundo o USSL (US Salinity Laboratory) (FEITOSA, 2008).

O RAS baseia-se no indicador do perigo de alcalinização ou sodificação do solo e na condutividade elétrica (CE). Quanto maior a RAS menos apropriada à água se torna para a irrigação, podendo então dizer que com o aumento do RAS aumenta a salinidade da água tornando-a imprópria para utilização agrícola, consequentemente imprópria para consumo humano.

Calcula-se o RAS através da equação 6 abaixo.

$$RAS = \frac{rNa^{+}}{\sqrt{\frac{r(Ca^{+2} + Mg^{+2})}{2}}}$$

Equação 6 - Equação para o cálculo da Razão de Adsorção de Sódio (RAS)

Onde r representa as concentrações dos íons presentes na equação (Na, Ca e Mg).

A classificação do USSL separa as classes em:

C1- Água de baixa salinidade.

C2 - Água de média salinidade.

C3 - Água com salinidade alta.

C4 - Água de salinidade muito alta.

S1 - Água fracamente sódica

S2 - Água medianamente sódica

S3 - Água altamente sódica.

S4 – Água extremamente sódica.

O resultado da equação combinado com a CE é plotado no gráfico representado na figura 7 abaixo.

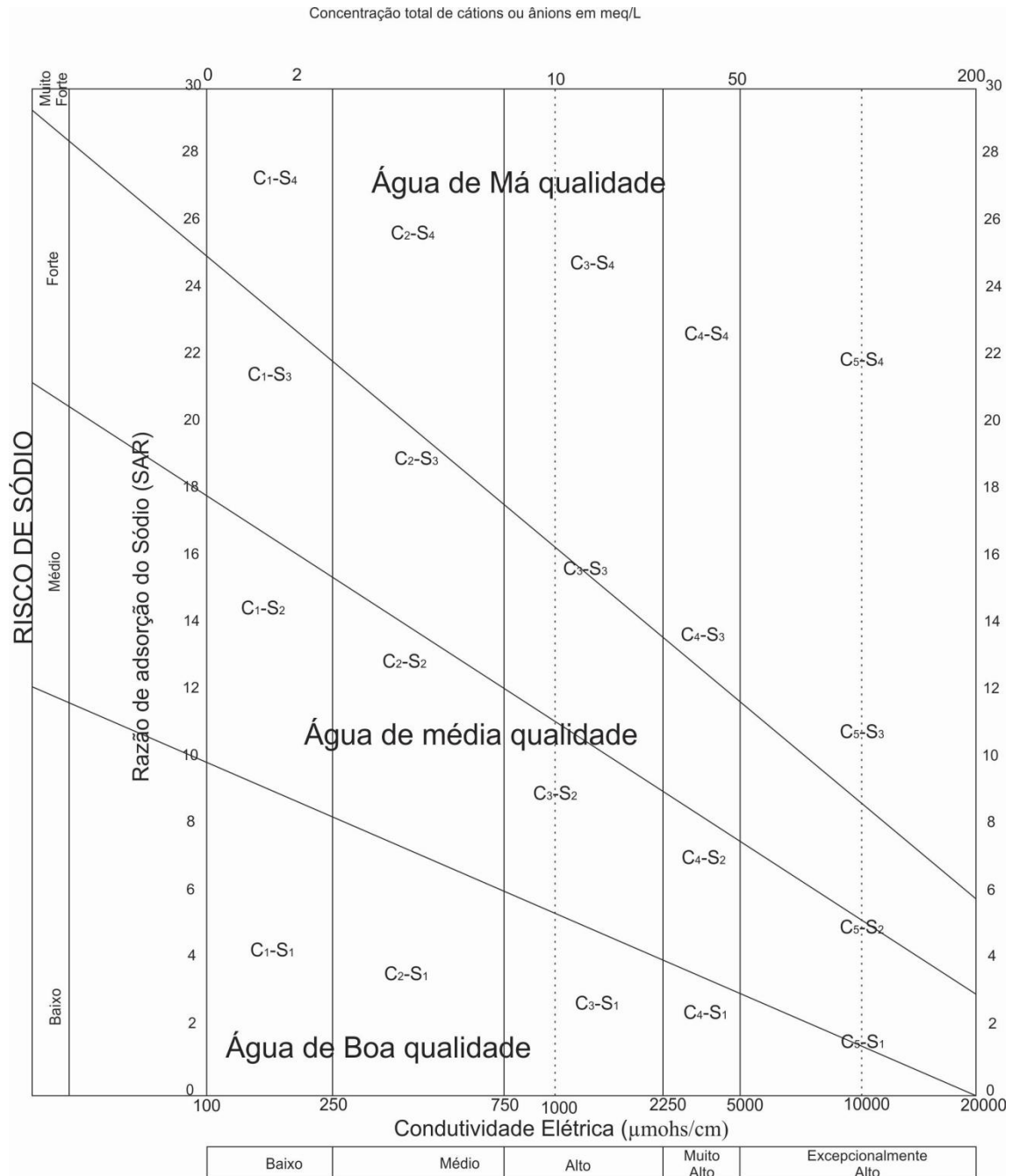


Figura 7 - Diagrama de classificação da água do United States Salinity Laboratory (USSL)

4 RESULTADOS

Os resultados das análises dos 57 pontos cadastrados permitiram uma caracterização geral do aquífero da área estudada.

Os resultados desta monografia estão estruturados da seguinte maneira:

1. Apresentação do banco de dados do cadastro de poços;
2. Interpretações Hidrogeoquímicas: estudo geoquímico da água através de diagramas hidrogeoquímicos, razões iônicas e mapas temáticos;
3. Isotopia: o estudo das características isotópicas permitiu estudar a origem e relações espaciais da água no presente aquífero;
4. Resultados obtidos através do software *PhreeqcI*;
5. Qualidade da água subterrânea.

4.1 Cadastro de poços.

No cadastro de poços (Apêndice 1) da área de estudo procurou-se atender a melhor distribuição espacial para que houvesse uma representação realista de todo o aquífero como representado na figura 8. Realizou-se o cadastro de 57 pontos de observação da área de estudo. Os pontos se dividem em 44 poços residenciais e 13 amostras superficiais (mar, lagoa de Maricá, mineração e dos canais presentes na área), dos quais em 27 pontos (21 poços residenciais e 06 amostras superficiais) foram realizadas análises físico-químicas completas (Figura 9).

Cadastro de Poços

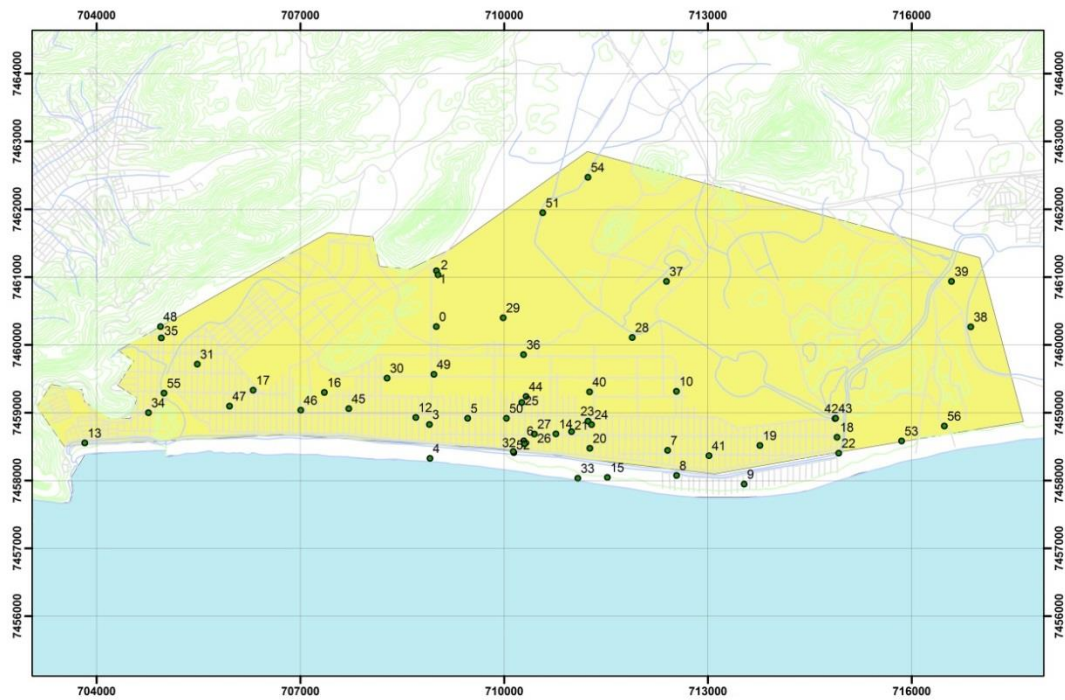


Figura 8 - Localização dos poços cadastrados na área do estudo.

Análises Químicas

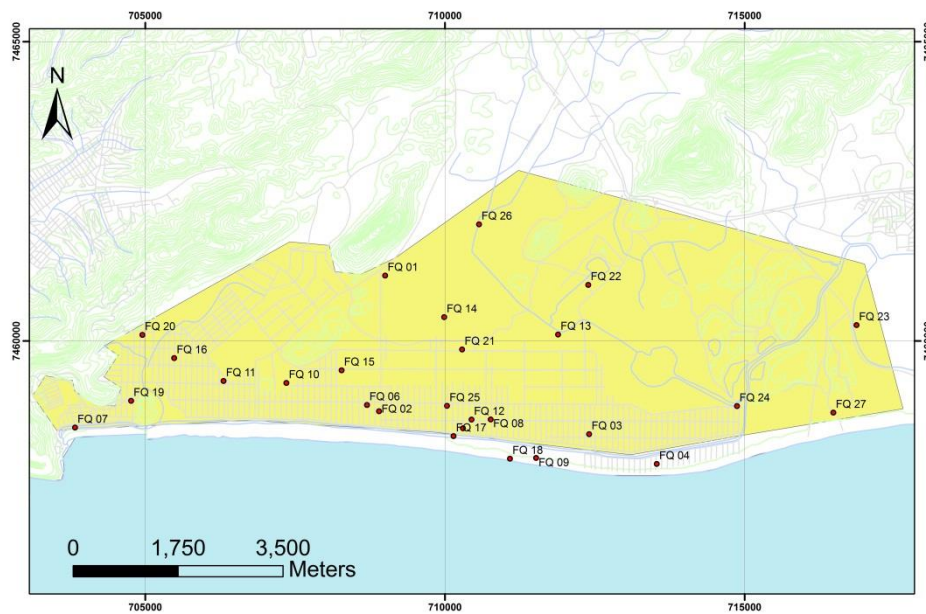


Figura 9 - Distribuição dos poços com análises físico-químicas completas na área do estudo.

A base de dados foi elaborada uma planilha em Excel com todos os dados das análises recolhidas em campo e as análises laboratoriais. As planilhas com os dados adquiridos serão apresentadas nos apêndices que se encontram no final deste trabalho.

4.2 Caracterização e Interpretação Hidrogeoquímica.

4.2.1 Cálculo do Erro das análises Físico-químicas.

Esta etapa de compilação da base de dados refere-se aos balanços de cargas iônicas das análises. Uma vez que o tipo de estudo a ser efetuado está baseado em representações gráficas, foram selecionadas as amostras que apresentaram balanços iônicos menores que 20% (Gastmans, 2005), onde o balanço de cargas foi calculado utilizando-se a expressão definida na metodologia deste trabalho (páginas 23 a 25, subitem 3.2.6).

Os erros observados apresentaram igual variação dos valores negativos e positivos. Onde os erros apresentam-se negativos, as concentrações de ânions analisados são ligeiramente superiores às concentrações de cátions, e onde se apresentam positivos, as concentrações de cátions analisados são ligeiramente superiores às concentrações de ânions.

Em virtude dos erros de balanços iônicos observados, foram descartadas 4 amostras, restando da base de dados originais 23 amostras (18 poços e 5 superficiais), conforme mostrado na tabela 8.

Após a análise dos erros e descarte das amostras com erro superior ao permitido, foram elaborados os diagramas hidroquímicos, calculadas as razões iônicas características, avaliada a qualidade química da água subterrânea e risco salino para o aquífero da região.

Tabela 8 - Erro de Análise Físico-química (medidas em meq/L)

ID	Mg	Na	Ca	K	Cl	HCO3	SO4	Br	$r_{\Sigma p}$	$r_{\Sigma n}$	$r_{\Sigma p} - r_{\Sigma n}$	$r_{\Sigma p} + r_{\Sigma n}$	Erro
FQ 01	0,727	5,959	0,366	0,038	2,959	1,172	1,041	0,010	7,09	5,17	1,92	12,26	15,64
FQ 02	0,205	1,404	0,377	0,213	0,892	0,586	0,491	0,001	2,20	1,97	0,23	4,17	5,49
FQ 03	0,238	1,350	0,609	0,184	0,784	0,586	0,249	0,000	2,38	1,62	0,76	4,00	19,05
FQ 04	0,121	1,065	0,048	0,143	0,713	0,586	0,276	0,000	1,38	1,58	-0,20	2,95	-6,72
FQ 05	0,159	0,923	0,390	0,096	0,734	0,586	0,230	0,000	1,57	1,55	0,02	3,12	0,59
FQ 06	0,208	1,621	0,534	0,248	0,852	0,586	0,472	0,000	2,61	1,91	0,70	4,52	15,50
FQ 07	0,221	2,026	0,604	0,149	1,300	0,586	0,756	0,000	3,00	2,64	0,36	5,64	6,34
FQ 08	0,222	0,732	0,670	0,097	0,679	5,705	0,004	0,249	1,72	6,39	-4,67	8,11	-57,56
FQ 09	1,450	10,952	0,885	0,219	9,944	1,508	0,045	0,508	13,51	11,50	2,01	25,00	8,04
FQ 10	0,336	1,619	0,173	0,162	1,203	0,269	0,006	0,583	2,29	1,48	0,81	3,77	21,57
FQ 11	0,290	1,628	1,115	0,180	1,330	0,626	0,004	0,493	3,21	1,96	1,25	5,17	24,22
FQ 12	0,213	1,935	0,630	0,244	1,403	0,036	0,952	0,002	3,02	2,39	0,63	5,41	11,66
FQ 13	0,105	0,419	0,142	0,025	0,654	0,225	0,005	0,001	0,69	0,88	-0,19	1,57	-12,19
FQ 14	0,086	0,404	0,152	0,023	0,603	0,234	0,002	0,001	0,67	0,84	-0,17	1,50	-11,56
FQ 15	0,203	0,879	0,230	0,044	1,079	0,284	0,029	0,002	1,36	1,39	-0,04	2,75	-1,30
FQ 16	0,242	1,442	0,359	0,201	1,045	0,147	0,696	0,001	2,24	1,89	0,36	4,13	8,60
FQ 17	70,083	303,03	13,700	6,205	380,28	1,656	41,458	0,062	393,02	423,40	-30,38	816,41	-3,72
FQ 18	110,00	463,20	20,600	10,000	600,00	2,426	61,875	0,062	603,80	664,30	-60,50	1268,10	-4,77
FQ 19	0,458	2,294	0,705	0,173	2,276	0,034	1,894	0,002	3,63	4,20	-0,57	7,83	-7,32
FQ 20	0,583	3,442	0,306	0,042	2,710	0,633	0,529	0,004	4,37	3,87	0,50	8,24	6,07
FQ 21	0,118	0,502	0,273	0,037	0,611	0,308	0,005	0,001	0,93	0,92	0,01	1,85	0,37
FQ 22	1,808	2,173	1,440	0,356	2,076	0,000	4,396	0,004	5,78	6,47	-0,69	12,25	-5,67
FQ 23	50,583	216,45	9,250	4,667	281,13	1,689	30,625	0,473	280,95	313,44	-32,49	594,39	-5,47
FQ 24	25,667	106,92	5,500	2,410	146,76	1,061	16,396	0,250	140,50	164,22	-23,71	304,72	-7,78
FQ 25	0,280	1,221	0,092	0,053	1,380	0,032	0,235	0,002	1,64	1,65	0,00	3,29	-0,10
FQ 26	0,867	4,061	1,130	0,379	3,042	6,443	0,485	0,004	6,44	9,97	-3,53	16,41	-21,54
FQ 27	0,225	0,846	0,225	0,030	1,023	0,078	0,203	0,002	1,33	1,30	0,02	2,63	0,86

4.2.2 Mapas de Isovalores

A partir da amostragem dos parâmetros físico-químicos *in situ*, foi possível elaborar mapas temáticos de isotores que representam a situação do aquífero costeiro de Itaipuaçu do ponto de vista geoquímico, foram elaborados os mapas de pH e CE.

4.2.2.1 Isovalores de pH

Pode-se observar na área estudada que as águas apresentam em geral um pH próximo a neutralidade a levemente ácido, com grande dispersão (Figura 10). Próximo ao oceano as amostras apresentam caráter alcalino.

4.2.2.2 Isovalores de Condutividade Elétrica

Os valores de condutividade elétrica para a maior parte das amostras apresentam salinidade entre 100 e 500 mg/L. Há uma área a leste, originalmente mais deprimida topograficamente chamada Lagoa Brava que encontra-se hoje assoreada, que é o local de valores mais baixos de salinização em toda área. Apenas três áreas apresentam salinidade alta, conforme representado no mapa representado na figura 11, uma área próxima ao mar e outras duas anexas a Pedra de Itaocaia.

Isovalores de pH

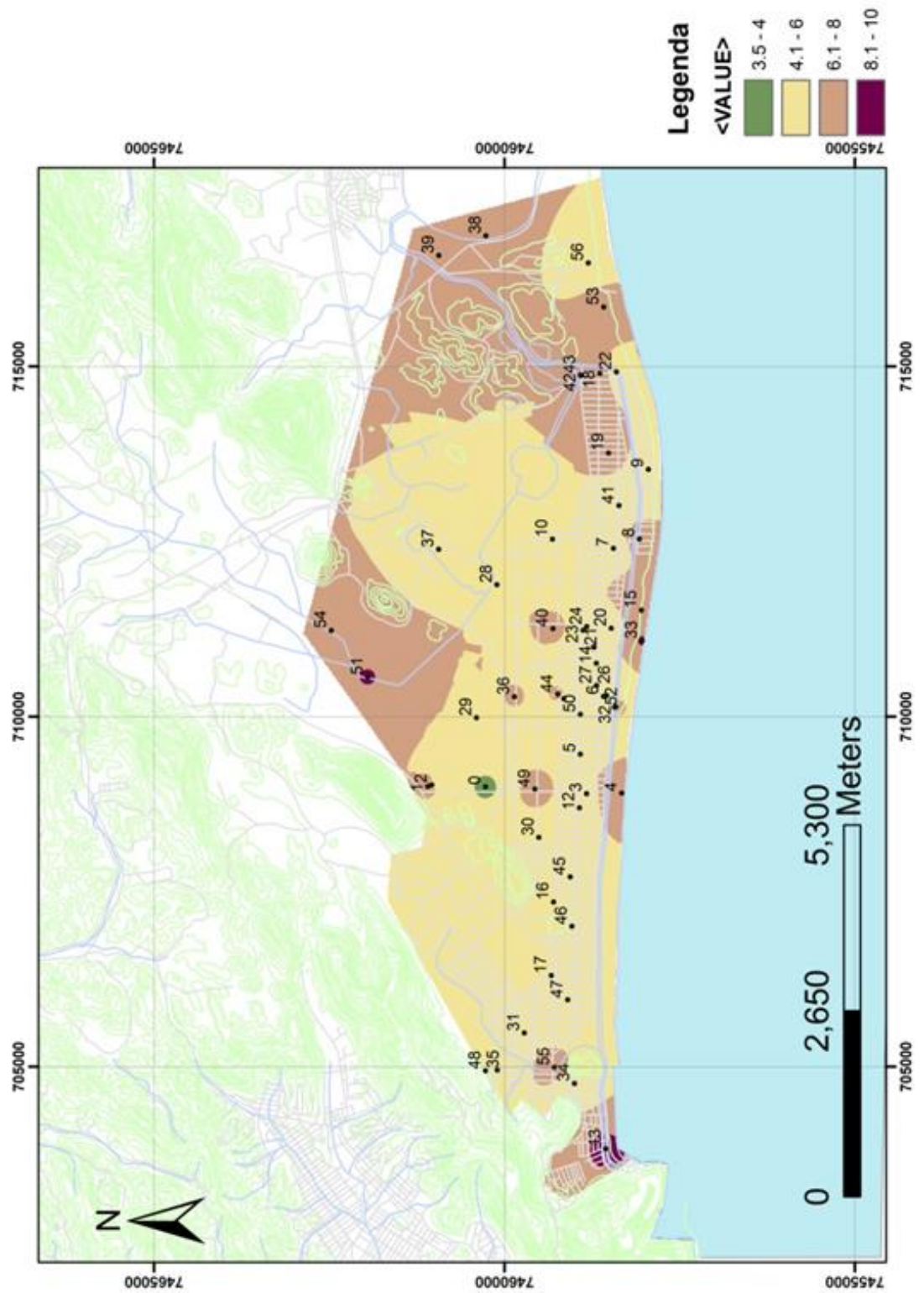


Figura 10 - Mapa de Isovalores de pH da água subterrânea da área do estudo

Isovalores de CE

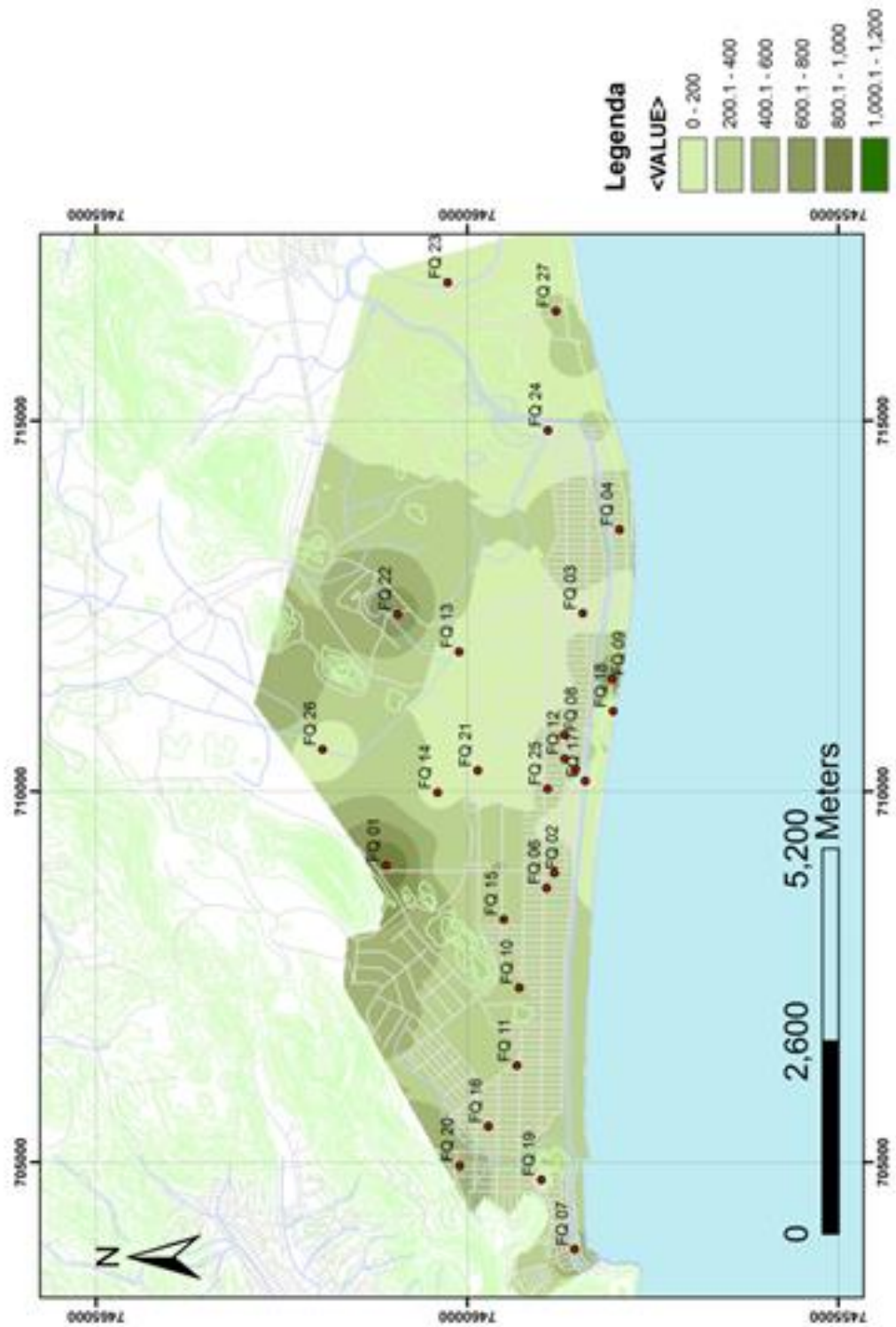


Figura 11 - Mapa de Isovalores de Condutividade Elétrica na água subterrânea da área do estudo.

4.2.3 Diagramas Hidroquímicos

4.2.3.1 *Diagrama de Piper*

As amostras de água subterrânea plotadas no diagrama de Piper conferem a esse grupo uma classificação predominantemente cloretada-sódica, com boa correlação de sódio com cloreto indicando que a proximidade da costa contribui para a presença de aerossóis marinhos, conforme mostra a figura 12. Para este gráfico foram escolhidas apenas as amostras dos poços residenciais que são as amostras respresentativas do aquífero raso da área de estudo. As demais amostras (águas superficiais e do mar) foram desconsideradas para essa análise, pois não caracterizam o aquífero.

4.2.3.1 *Diagrama de Stiff*

O diagrama de Stiff, representado na figura 13 abaixo, demonstra a distribuição espacial dos poços e as classificações das águas, tanto superficiais quanto subterrâneas e suas assinaturas químicas. Percebe-se que as assinaturas são predominantemente cloretadas sódicas.

Diagrama de Piper

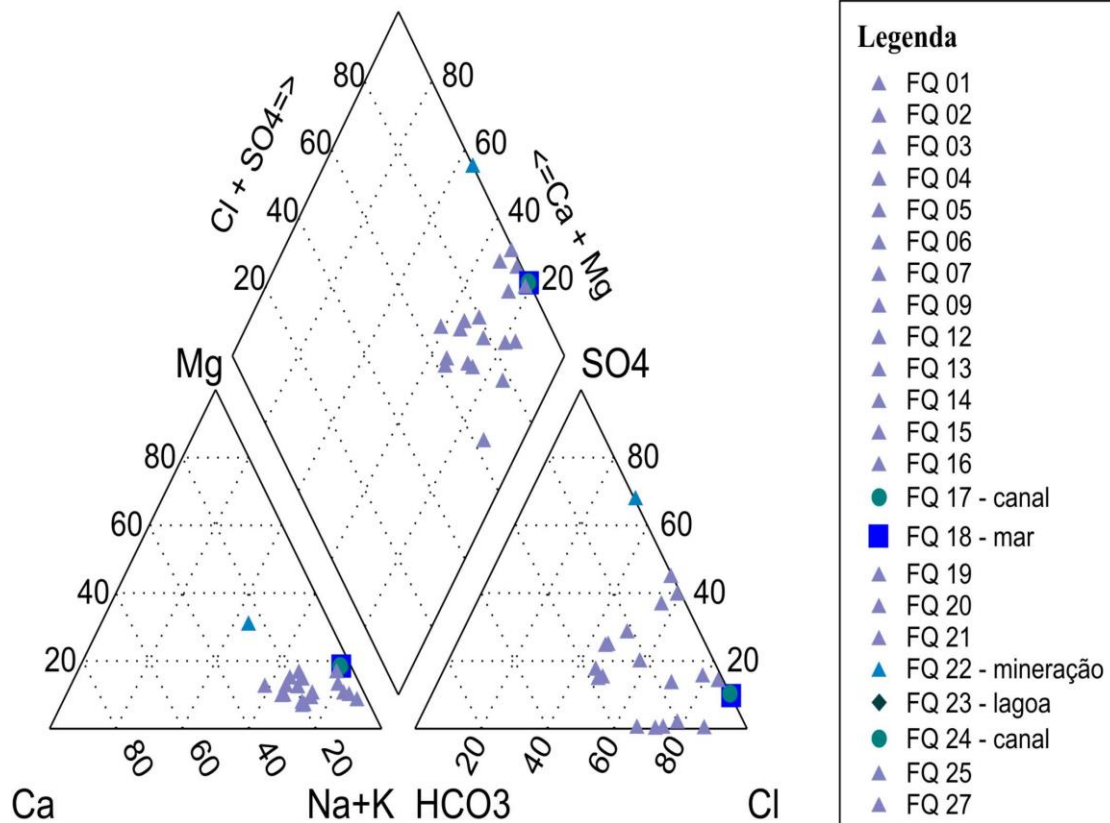


Figura 12 - Diagrama de Piper representativo da área do estudo

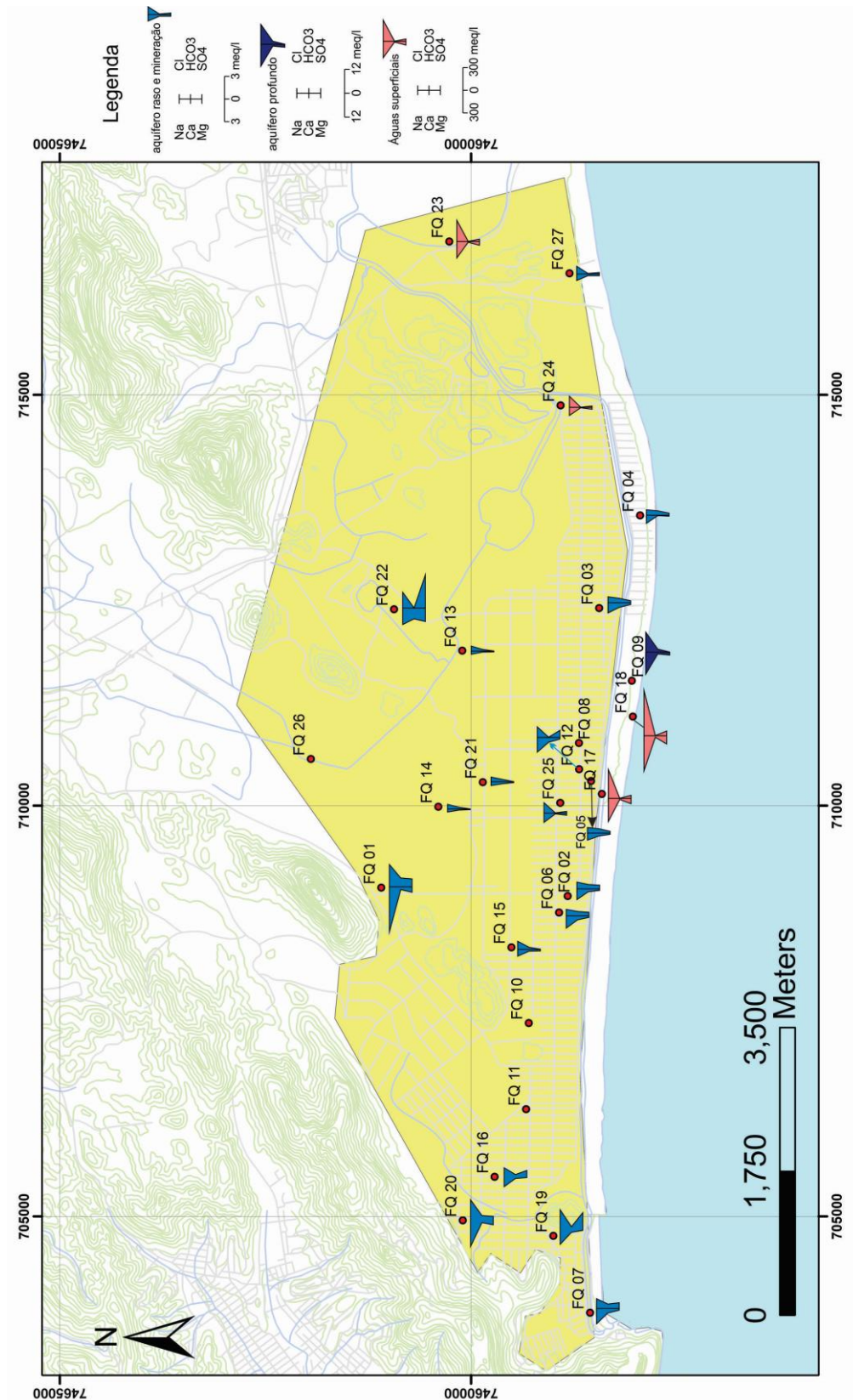


Figura 13 - Diagrama de Stiff representativo da área do estudo.

4.2.3.2 Diagrama de Schoeller

A Figura 14 representa o diagrama de Schoeller para as amostras de água subterrânea e superficiais, determina que as amostras, de modo geral, são enriquecidas em sódio e cloreto, mostrando uma assinatura química de diluição da água do mar. As relações iônicas envolvendo o sulfato são próximas às da água marinha para os canais e a lagoa e resultam distintas para as águas continentais costeiras não diretamente influenciadas pela salinidade marinha. Isso se deve aos processos normais de redução de conteúdo em sulfatos no ambiente continental.

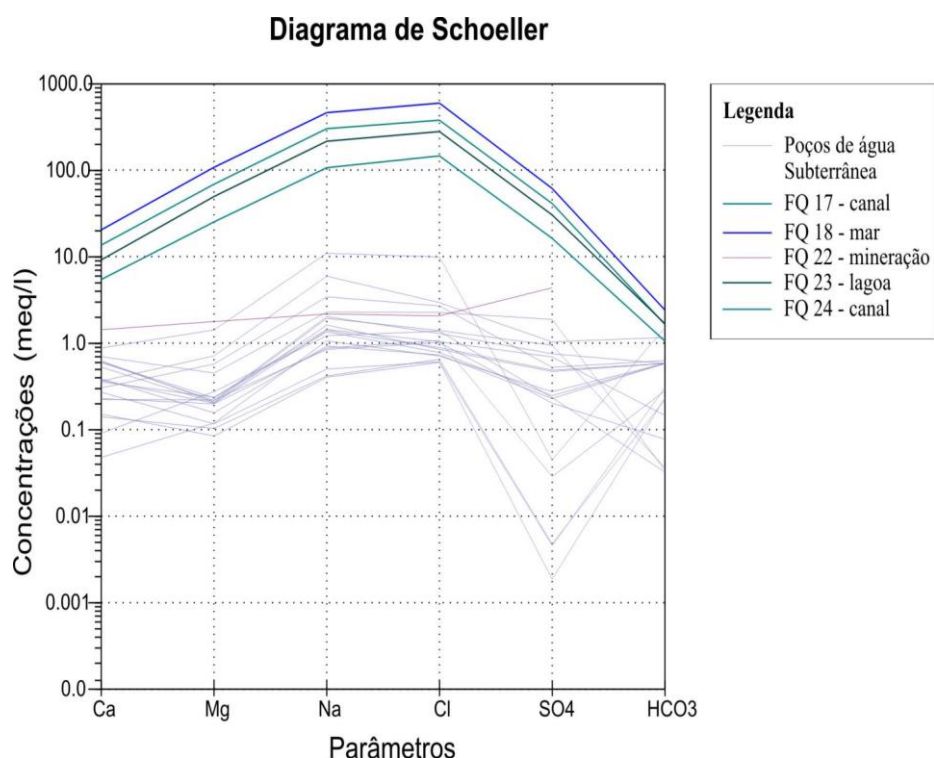


Figura 14 - Diagrama de Schoeller representativo das análises químicas da área do estudo.

4.2.4 Qualidade da Água Subterrânea

A classificação da qualidade físico-química das amostras de água analisadas está demonstrada na tabela 9 a seguir, já retiradas as 4 amostras com erro superior a 20%. A tabela 9 apresenta a relação entre os parâmetros analisados em laboratório com os VMPs definidos na resolução 396/2008, e apresenta os VMPs e os valores das análises recebidas do laboratório. Os valores realçados em vermelho indicam valores superiores aos permitidos e os em azul, valores abaixo do permitido.

Tabela 9 - Tabela comparativa dos VMPs dos parâmetros físico-químicos com os valores das amostras analisadas.

Parâmetros Físico-químicos		Sólidos Totais dissolvidos (STD)	Cor Aparente	Dureza Total	Turbidez	pH
Unidade		mg/L	uH	mg/L	uT	
VMP		1000	15	500	5	6,0 - 9,5
FQ	Identificação					
FQ 01	poço	515	65,49	79,27	4,22	6,12
FQ 02	poço	157	149,98	59,45	6,98	5,75
FQ 03	poço	101	2,54	59,45	0,49	5,22
FQ 04	poço	120	24,31	29,72	0,94	5,04
FQ 05	poço	167	0,49	44,59	0,49	5,50
FQ 06	poço	184	18,33	59,45	1,12	5,30
FQ 07	poço	213	49,01	59,45	2,54	8,40
FQ 09	poço 40 m	394	nd	116,00	nd	7,25
FQ 12	poço	124	11,20	42,00	1,00	4,55
FQ 13	poço	51	8,00	12,30	0,99	5,95
FQ 14	poço	60	6,60	11,80	4,00	5,86
FQ 15	poço	96	6,00	21,50	0,99	5,75
FQ 16	poço	145	13,00	29,90	0,99	5,47
FQ 19	poço	83	16,80	57,80	0,99	4,80
FQ 20	poço	258	2,90	44,10	6,00	5,90
FQ 21	poço	65	64,70	19,50	26,00	6,10
FQ 25	poço	126	363,00	18,40	20,00	4,50
FQ 27	poço	103	0,80	22,30	0,99	4,70

Quanto às características físicas (cor e turbidez), percebe-se que as águas subterrâneas locais, de uma maneira geral não apresentam boa qualidade, com valores acima do VMP em 50% dos poços residenciais. Note-se que tais valores foram obtidos em amostras não filtradas, o que dificulta a comparação. Ao analisar as características químicas (STD, pH e dureza total) nota-se que tanto para os STD quanto para dureza as águas subterrâneas não apresentam valores anômalos, já o pH apresenta valores abaixo dos VMP, o que não traz prejuízos para a qualidade da água local.

A tabela 10 apresenta as substâncias que apresentaram alguma anomalia nos VMPs. Percebe-se que as águas demonstram boa qualidade química, apesar de apresentar anomalia nos valores de Fe e Al, a não filtragem das amostras durante a coleta pode explicar os teores elevados desses metais, os valores anômalos são pontuais como podem ser vistos através do IS da gohetita e hematita. As anomalias de Fe e Al podem ser facilmente tratadas. Os valores de Na e Cl para todos os poços analisados, com

exceção do poço FQ 09, que representa o aquífero mais profundo da área com 40 m de profundidade, apresentam valores abaixo do VMP, o que indica que a água não está salinizada. Os valores elevados de nitrato em alguns poços indicam proximidade com atividade geradora de resíduos orgânicos, provavelmente a proximidade das fossas sépticas influencia esses valores elevados.

Tabela 10 - Tabela comparativa dos VMPs (valores em mg/L) para substâncias que apresentam risco à saúde

Parâmetros Físico-químicos			Na	Cl	SO ₄	Fe	NO ₃	Al
Unidade			mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
VMP			200	250	250	0,3	10	0,2
ID	ID FQ	Identificação						
1	FQ 01	poço	137,650	105,030	49,950	0,380	0,130	0,060
3	FQ 02	poço	32,440	31,680	23,580	0,210	3,640	0,360
7	FQ 03	poço	31,190	27,830	11,930	0,010	36,710	0,010
9	FQ 04	poço	24,610	25,310	13,260	0,560	2,900	0,010
11	FQ 05	poço	21,330	26,040	11,050	0,010	19,300	0,390
12	FQ 06	poço	37,440	30,230	22,660	0,010	30,880	0,030
13	FQ 07	poço	46,810	46,150	36,300	0,760	1,950	0,010
15	FQ 09	poço 40 m	253,000	353,000	2,170			
26	FQ 12	poço	44,700	49,800	45,700	0,025	90,100	2,680
28	FQ 13	poço	9,670	23,200	0,230	0,540	0,024	0,057
29	FQ 14	poço	9,340	21,400	0,090	0,630	0,012	0,089
30	FQ 15	poço	20,300	38,300	1,380	3,670	0,110	0,033
31	FQ 16	poço	33,300	37,100	33,400	0,024	9,540	0,230
34	FQ 19	poço	53,000	80,800	90,900	6,300	16,100	0,860
35	FQ 20	poço	79,500	96,200	25,400	0,230	11,000	0,280
36	FQ 21	poço	11,600	21,700	0,220	1,370	0,039	0,082
50	FQ 25	poço	28,200	49,000	11,300	0,600	0,100	0,770
56	FQ 27	poço	19,550	36,300	9,760	0,005	4,870	0,260

Os Mapas das figuras 15 a 19 apresentam a distribuição espacial dos valores de Na, Cl e Fe respectivamente, presentes na água.

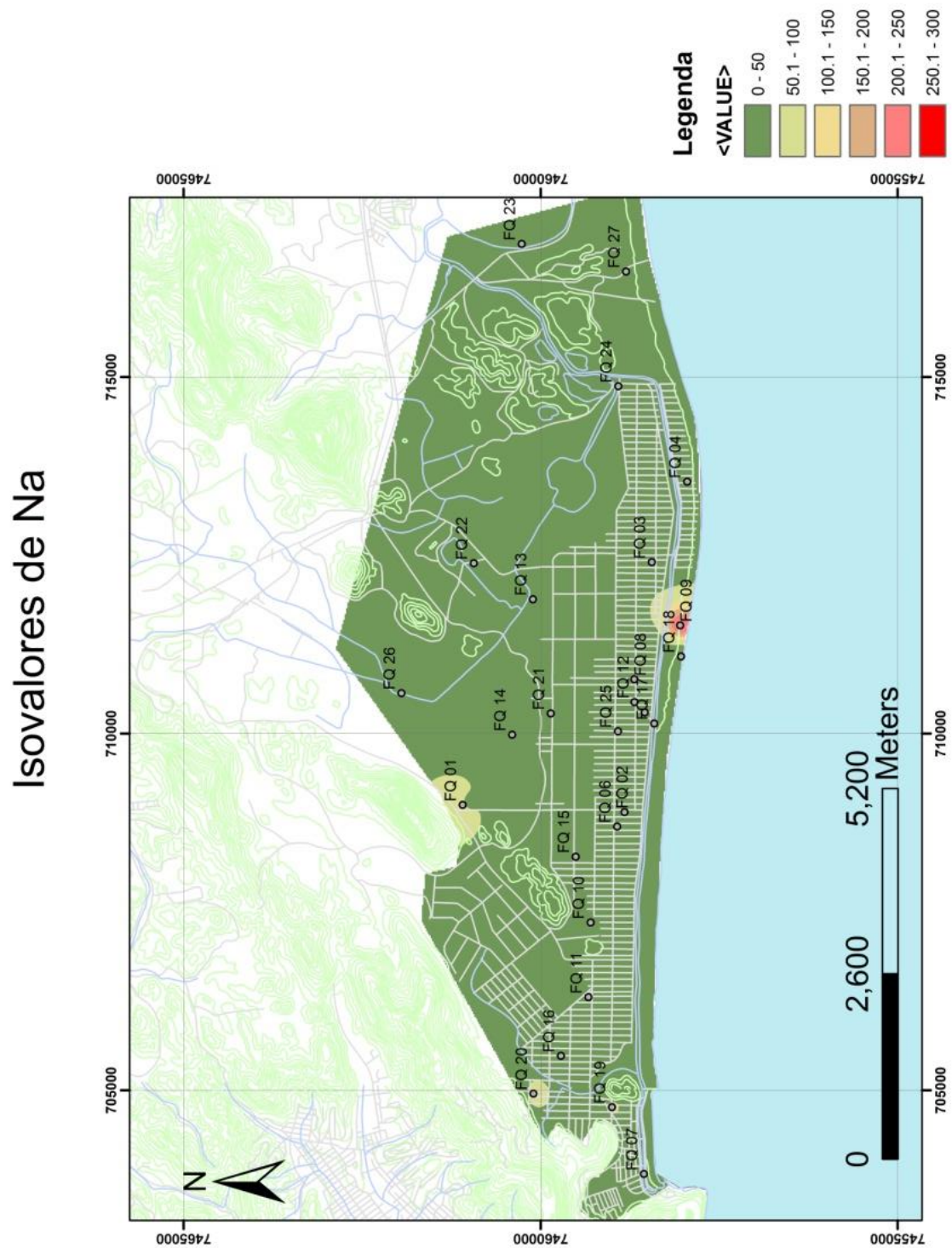


Figura 15 - Mapa de isovalores de Sódio (Na) na água subterrânea em mg/L na área do estudo.

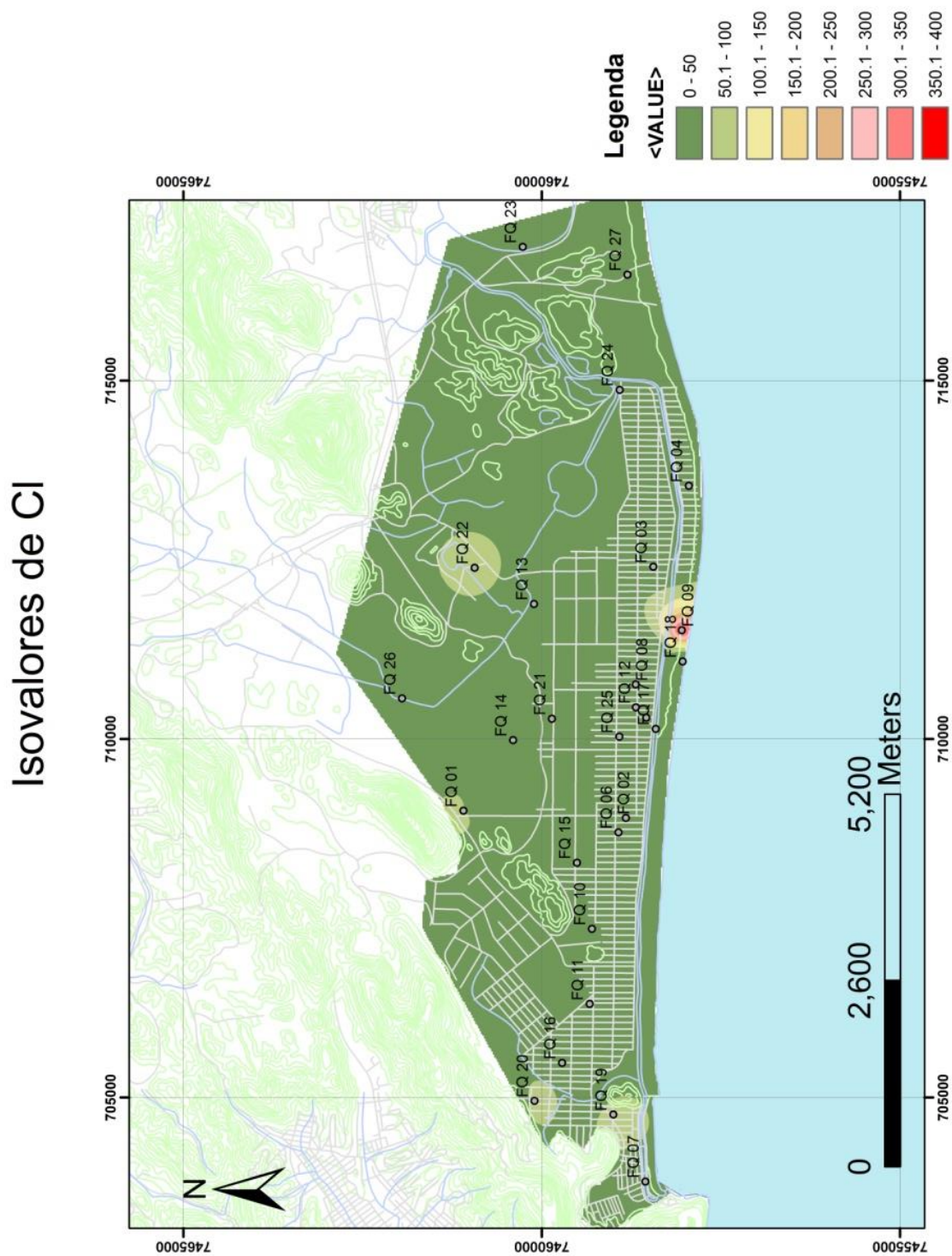


Figura 16 - Mapa de Isovalores de Cloreto (Cl) na água subterrânea em mg/L da área de estudo.

Isovalores de Fe

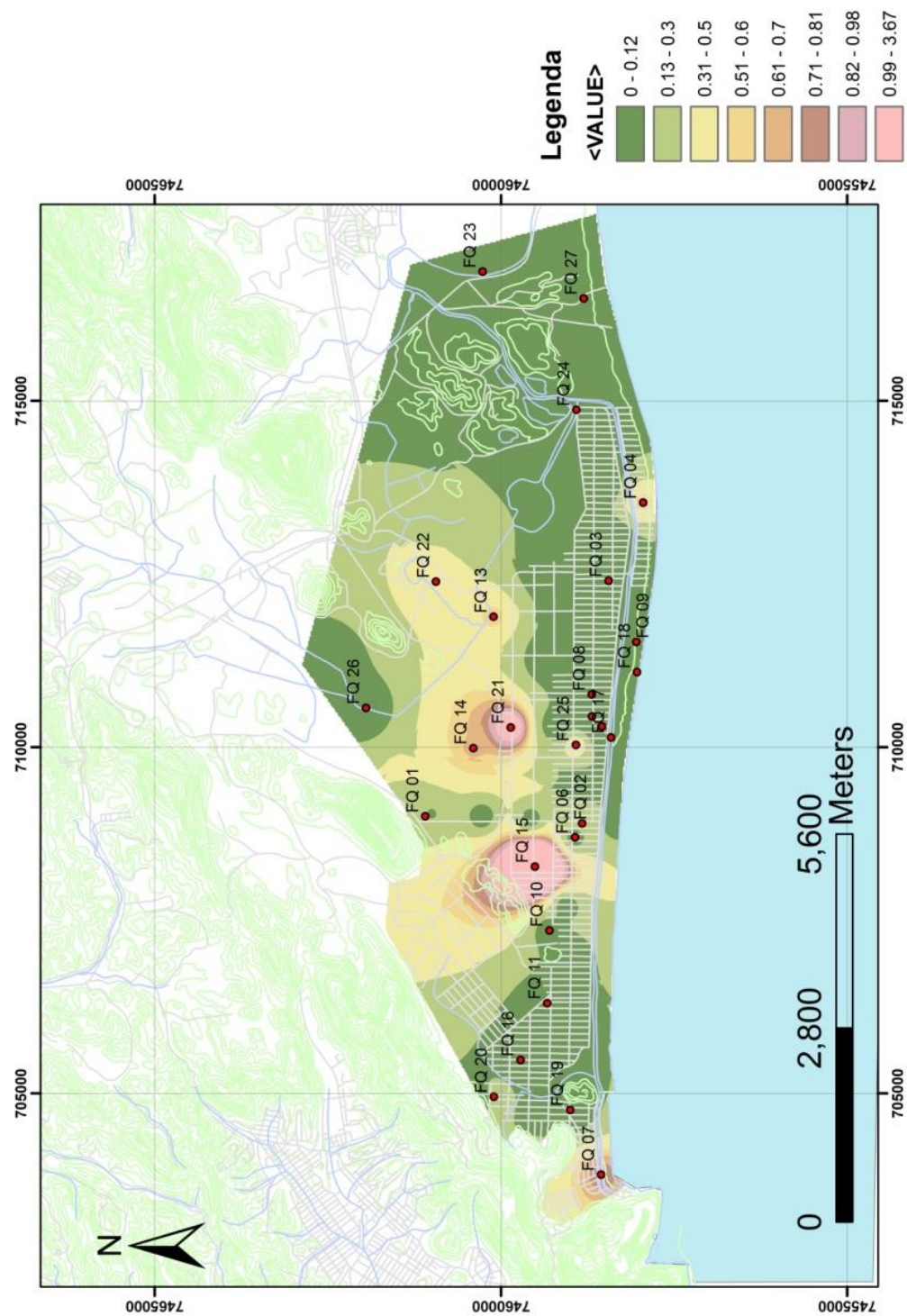


Figura 17 - Mapa de Isovalores de Ferro (Fe) na água subterrânea em mg/L na área do estudo.

Isovalores de Al

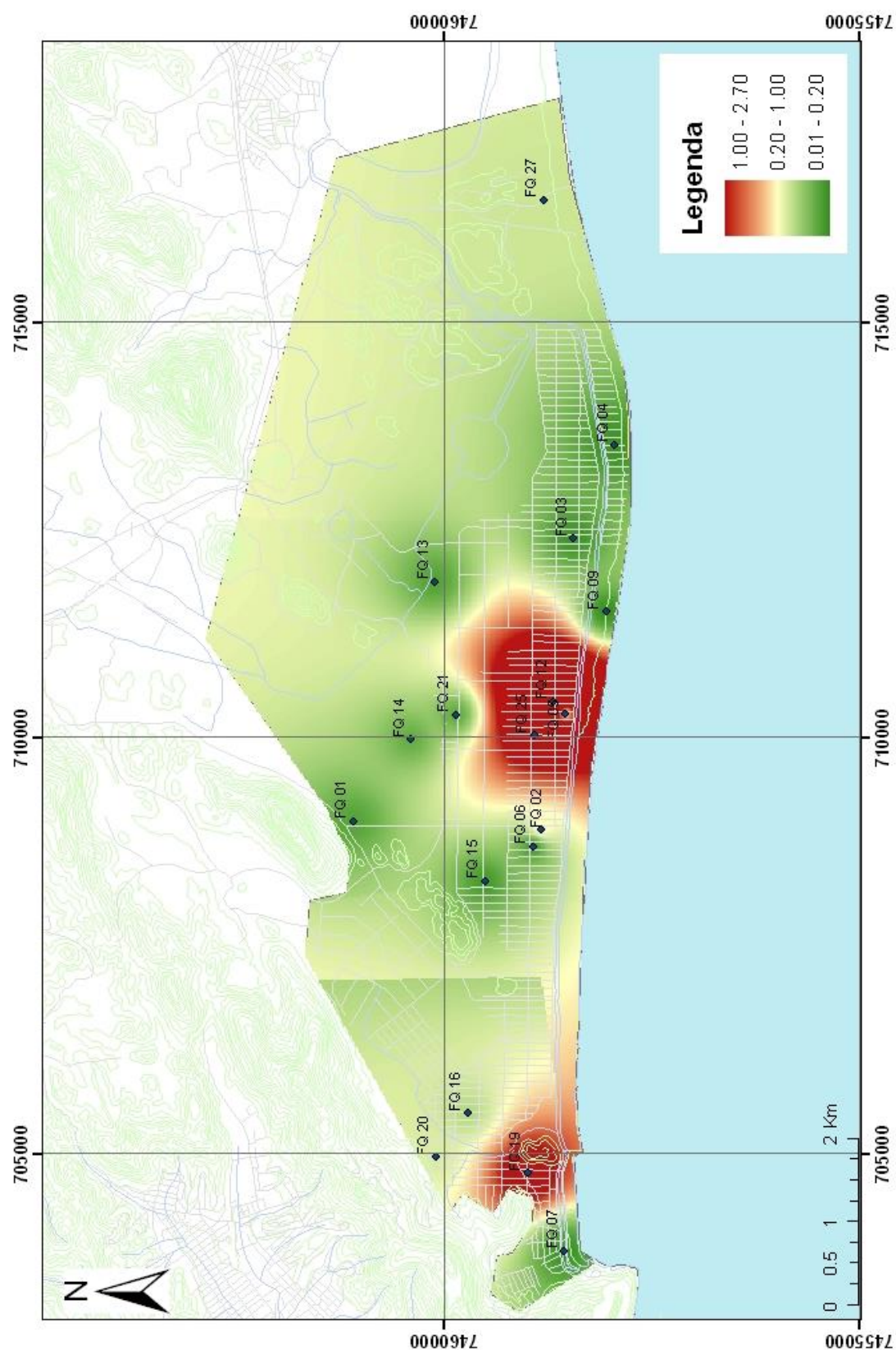


Figura 18 - Mapa de Isovalores de Alumínio (Al) na água subterrânea em mg/L na área do estudo.

Isovalores de NO₃

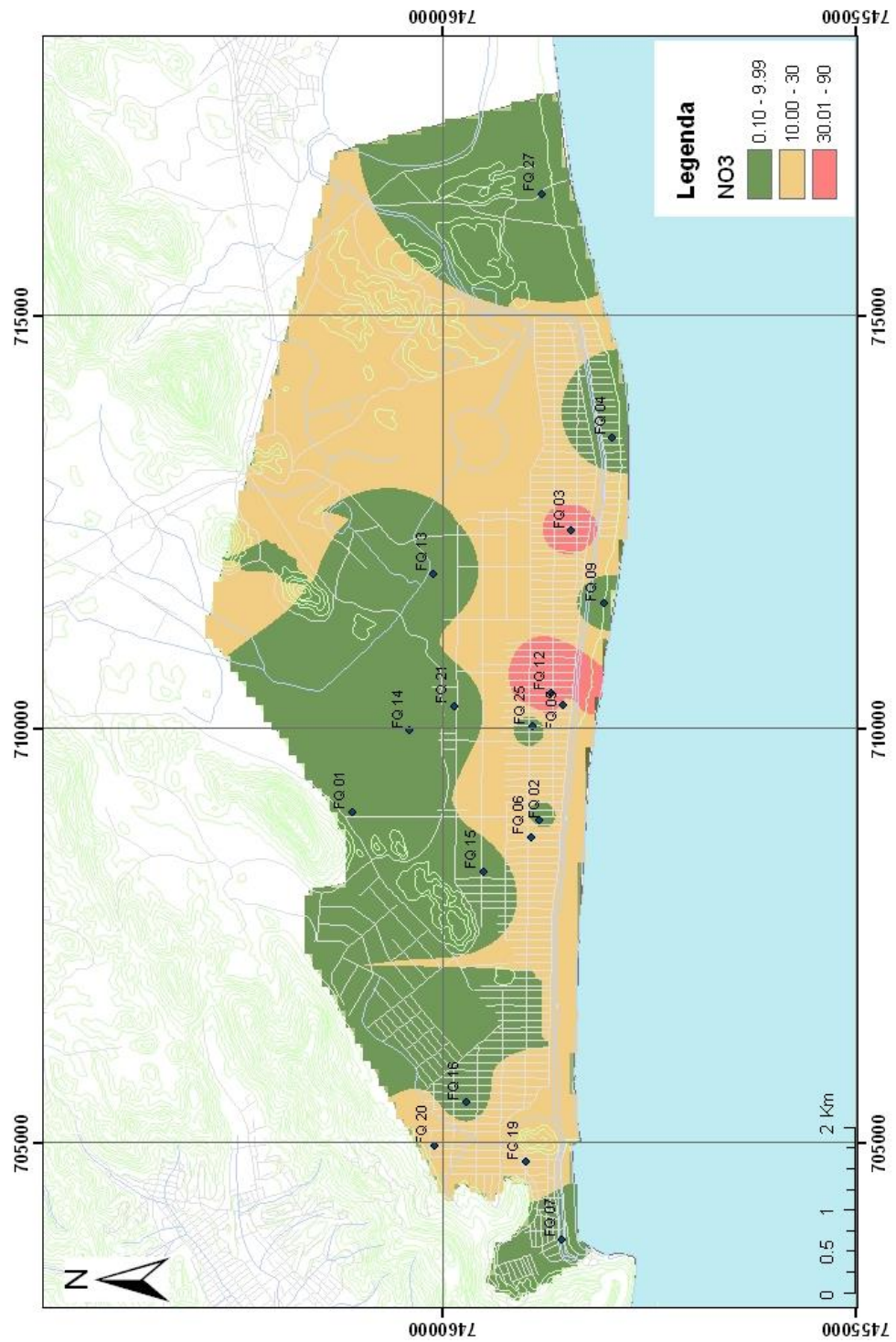


Figura 19 - Mapa de Isovalores de Nitrato (NO₃) na água subterrânea em mg/L na área do estudo.

4.2.5 Risco Salino

Embora seja um parâmetro utilizado para a temática da irrigação, o resultado do RAS aprimora o conhecimento sobre a qualidade relativa à salinidade da água.

A figura 20 ilustra a classificação das águas locais. Conforme pode ser observado, praticamente todas as amostras estão localizadas na parte inferior do gráfico, nas classes C1-S1 (baixa salinidade e baixo teor de sódio) e C2-S1 (média salinidade e baixo teor de sódio). Essas áreas representam águas de boa qualidade. Já os 2 pontos na zona C3-S2 representam águas de alta salinidade e médio teor de sódio: são os pontos FQ 1 e FQ9.

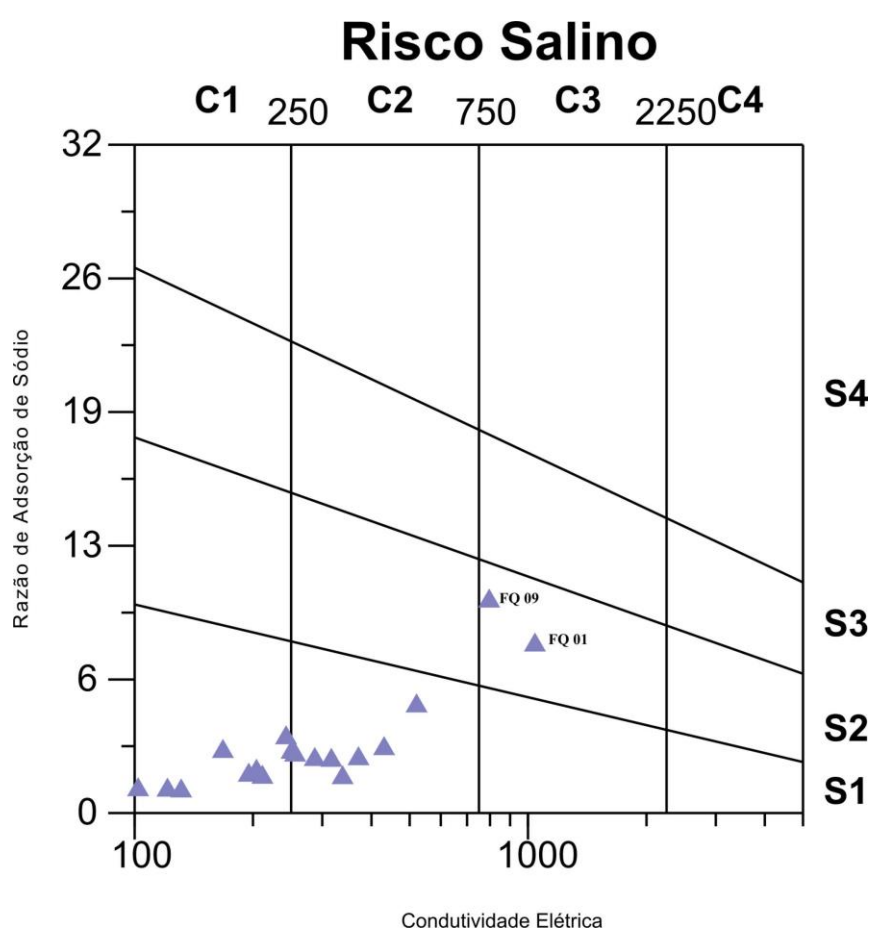


Figura 20 - Diagrama representativo do Risco Salino (Razão de Adsorção de Sódio – RAS) das águas subterrâneas da área do estudo.

4.2.6 Razões Iônicas

4.2.6.1 Razão rMg^{+2}/rCa^{+2}

A razão rMg/rCa indica que a maior parte do grupo de amostras possui assinatura de águas continentais, conforme mostra a Figura 21.

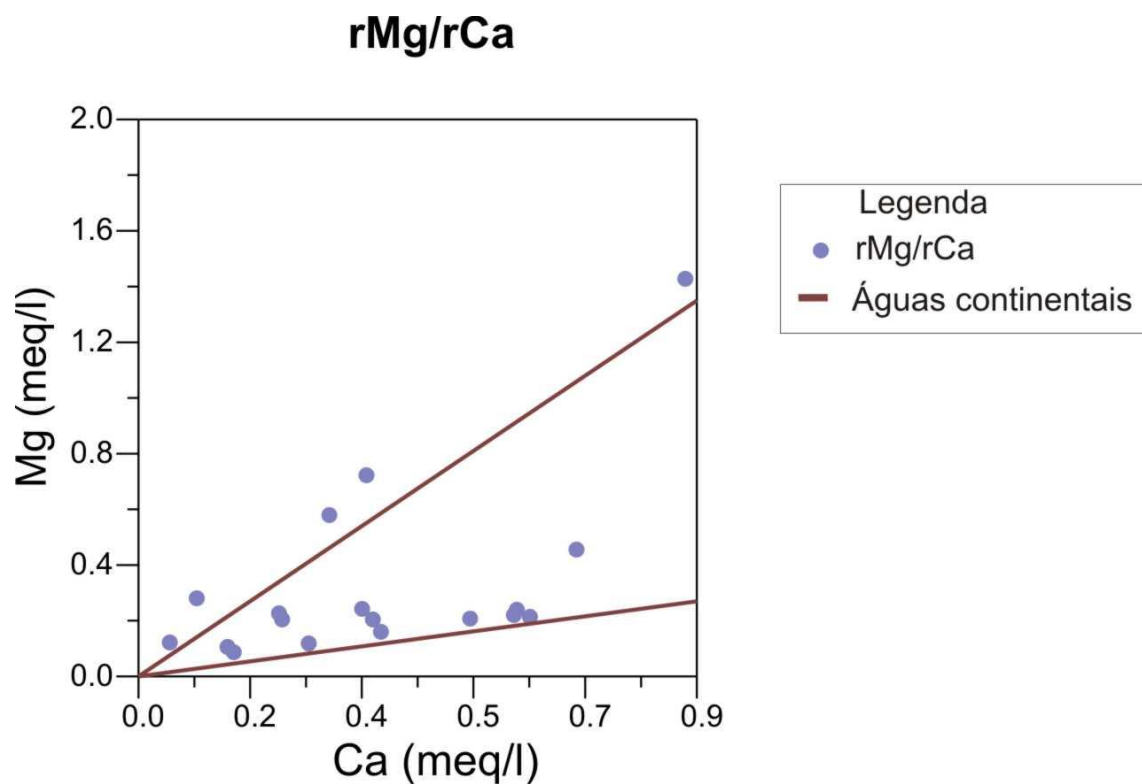


Figura 21 - Razão Iônica rMg/rCa característica das águas subterrâneas da área do estudo

4.2.6.2 Razão rCl/HCO_3^-

Assim como a razão rMg/rCa , a razão $rCl/rHCO_3$ indica que o grupo de amostras de água subterrânea analisadas para a pesquisa possui uma assinatura compatível com águas continentais, como pode ser observado na figura 22.

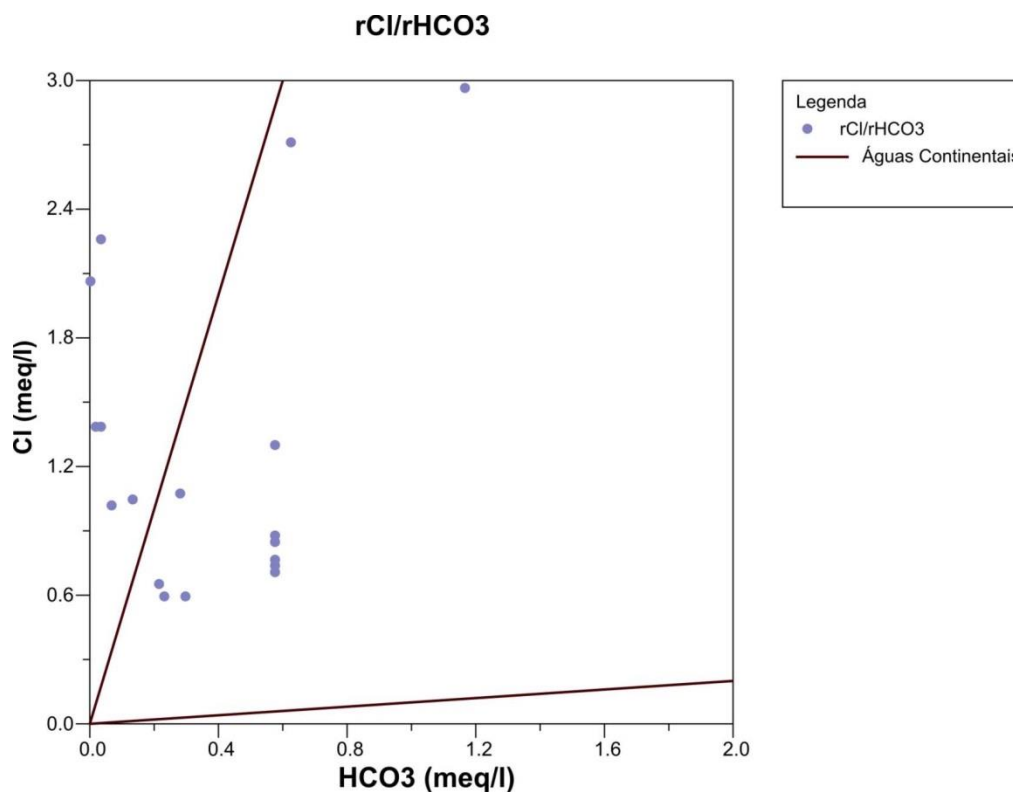


Figura 22 - Razão Iônica $rCl/rHCO_3$ característica das águas subterrâneas da área do estudo

4.2.6.1 Razão rCl^-/rBr^-

O comportamento geoquímico do Br^- é semelhante ao do Cl^- , pois as águas doces naturais apresentam concentrações de Br^- inferiores a 0,01 mg/L, e menores que 65 mg/L, tanto para as águas de origem marinha como águas subterrâneas continentais. De um modo geral, as concentrações de Cl^- são inferiores a 100 mg/L e nos oceanos apresentam valores que oscilam entre 18.000 a 21.000 mg/L (DAVIS *et al.*, 1998 apud Gomes *et al.*, 2013).

A Figura 23 mostra que algumas amostras da área de estudo têm afinidade com a água marinha, porém isso pode ser explicado pela constante presença de aerossóis marinhos na água da chuva, sendo esta uma das razões para que, mesmo um aquífero sem nenhuma indicação de intrusão salina, possa apresentar uma assinatura relacionada a água do mar.

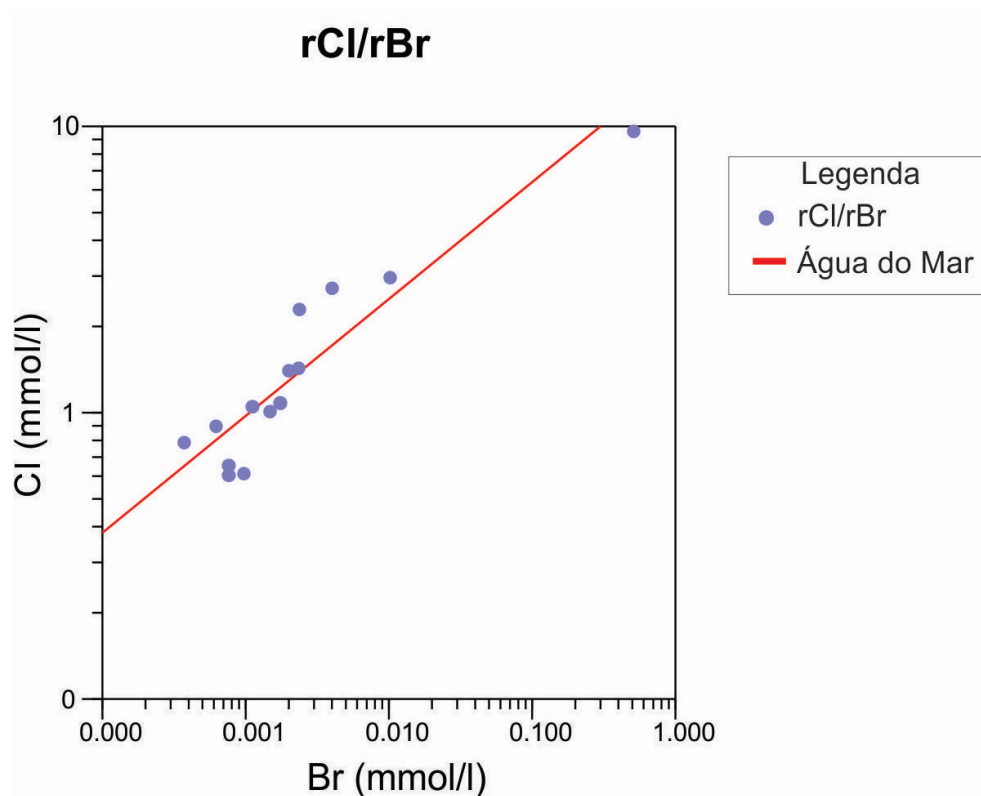


Figura 23 - Razão rCl/rBr em escala logarítmica característica das águas subterrâneas da área do estudo.

4.2.6.2 Razão rNa^+/Cl^-

A razão Na/Cl demonstra que a maior parte das amostras coletadas possui uma relação iônica próxima à água marinha, porém, os resultados não necessariamente indicam que está havendo movimentação ou intrusão salina na área de estudo, uma vez que as razões rMg/rCa e $rCl/rHCO_3$, que indicam águas de origem continental. Devido a grande influência dos aerossóis marinhos na água da chuva que incide sobre a área, a água do aquífero acaba obtendo as características da água que recarrega o manancial, ainda que diluída. A Figura 24 demonstra a razão entre os íons de sódio e cloro.

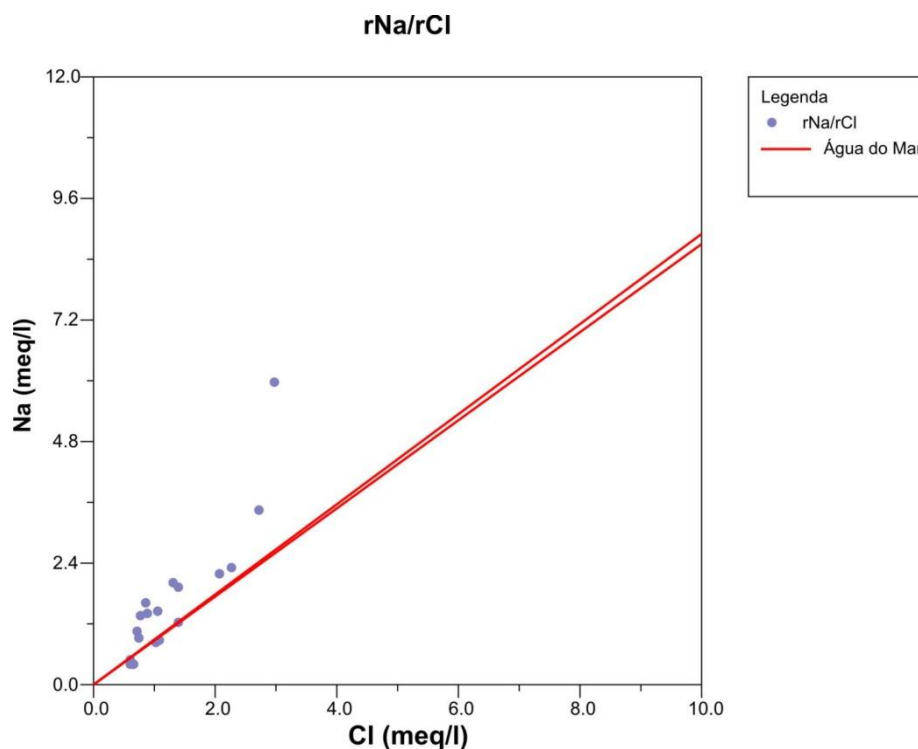


Figura 24 - Razão Iônica rNa/rCl característica das águas subterrâneas da área do estudo.

4.2.6.3 Índice de Saturação (SI)

O cálculo do índice de saturação (Tabela 11) foi realizado para as amostras com análises equilibradas na área de Itaipuaçu. Com o auxílio do *PhreeqcI* foram calculados os índices de saturação de minerais permitindo a elaboração de hipóteses sobre o comportamento hidrogeoquímico da área de estudo.

Os minerais carbonáticos se encontram subsaturados em solução ($IS < 0$), variando na faixa entre -0,16 e -21,85. Cerca de 70% das amostras encontram-se supersaturadas em solução ($IS > 0$) nos minerais Goethita e Hematita. Os demais minerais de ferro, alumino-silicatos e os outros minerais em geral apresentam-se subsaturados. Tais resultados apontam para um ambiente predominantemente formado pela presença de processos pedológicos com a laterização, o que pode explicar o por que da goethita e hematita estarem supersaturados no aquífero.

Foram calculados apenas os índices de saturação para as amostras de água subterrâneas. As amostras com erro acima de 20% e as amostras da água da chuva, do mar, da lagoa de Maricá e dos corpos hídricos superficiais não foram calculadas por não ser esse o objeto da pesquisa.

Tabela 11 - Índices de saturação da área do estudo

Amostras	IS Calcita	IS Dolomita	IS Gipsia	IS Goetita	IS Hematita
FQ 01	-2,56	-4,76	-2,80	4,66	11,3
FQ 02	-2,96	-6,13	-2,99	3,36	8,7
FQ 03	-3,28	-6,90	-3,07	0,49	2,97
FQ 04	-4,83	-9,20	-4,07	1,6	5,18
FQ 05	-3,30	-6,93	-3,27	0,87	3,72
FQ 06	-3,27	-6,88	-2,86	0,46	2,91
FQ 07	-0,16	-0,69	-2,64	7,2	16,38
FQ 09	-0,93	-1,59	-3,88		
FQ 12	-4,10	-8,62	-2,52	-0,92	0,15
FQ 13	-3,81	-7,68	-12,51	-2,72	-3,45
FQ 14	-3,88	-7,95	-11,58	-2,65	-3,31
FQ 15	-3,58	-7,16	-9,41	-2	-2,01
FQ 16	-3,56	-7,24	-2,86	0,61	3,21
FQ 19	-3,72	-7,58	-2,24	1,3	4,58
FQ 20	-3,07	-5,80	-3,11	2,34	6,67
FQ 21	-3,18	-6,67	-6,93	-1,4	-0,81
FQ 25	-5,28	-10,01	-3,88	-2,83	-3,68
FQ 27	-4,76	-9,97	-5,35		

4.2.6.4 Índice de saturação da Calcita

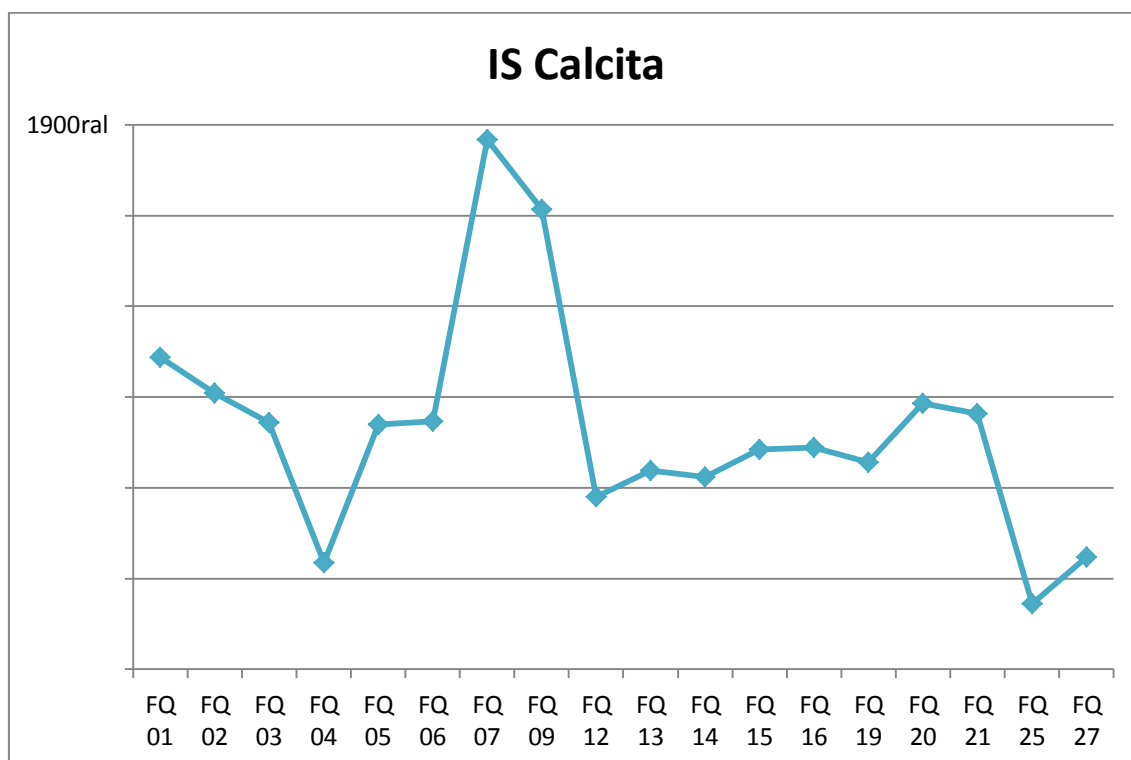


Figura 25 - Índice de Saturação da Calcita das águas subterrâneas da área do estudo.

A partir dos dados do índice de saturação da calcita, é possível notar que o $IS_{calcita}$ encontra-se abaixo dos valores de saturação em todas as amostras, podendo-se observar que na área há um ambiente pouco variável em relação à saturação do mineral. Destacam-se apenas duas áreas em que índices próximos a saturação podem ser encontrados, coincidindo com valores elevados de salinidade (água marinha pouco diluída), como se pode observar no gráfico da figura 25.

4.2.6.5 Índice de saturação da Dolomita

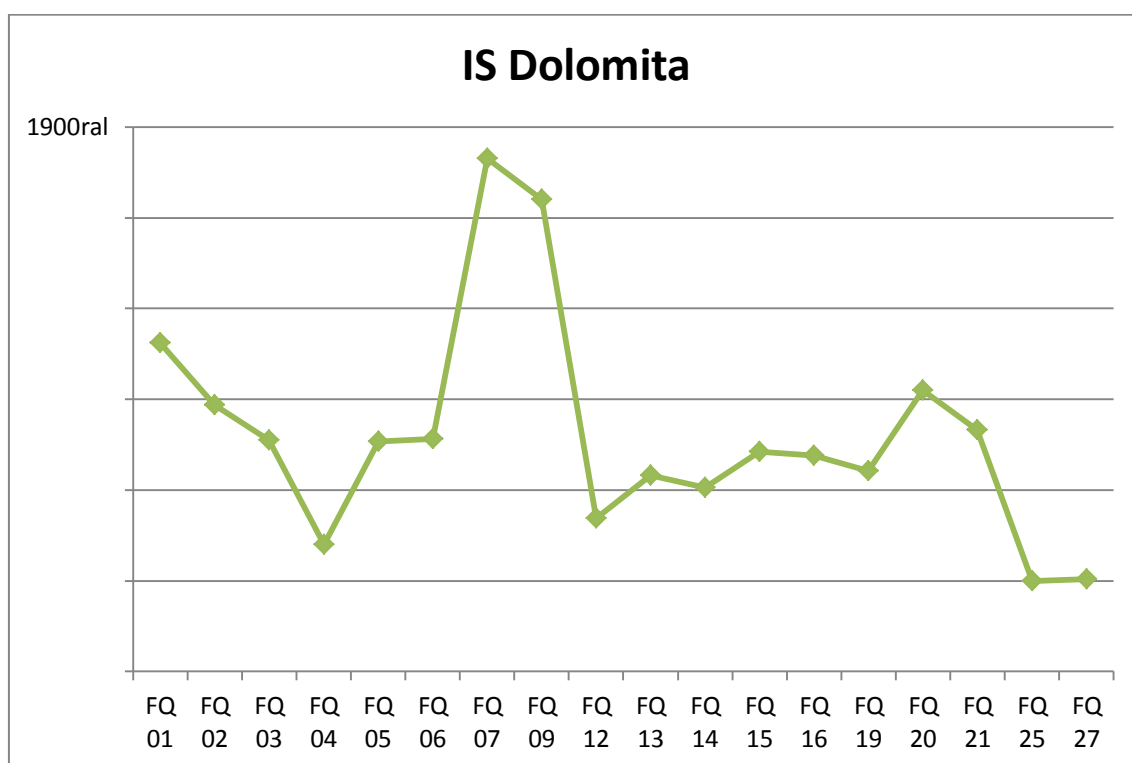


Figura 26 - Índice de Saturação da Dolomita das águas subterrâneas da área do estudo.

O índice de saturação da dolomita é similar ao da calcita, é possível notar que a dolomita encontra-se subsaturada em todas as amostras (figura 26). Pode-se observar que na área há um ambiente pouco variável em relação à saturação do mineral, destacando-se apenas duas áreas em que índices próximos a saturação podem ser encontrados, sendo que a variação no índice de saturação da dolomita é maior que o da calcita.

4.2.6.6 Índice de saturação da Gipsita

A gipsita apresenta índices de saturação menores que os da calcita e da dolomita. Os valores encontram-se próximos a saturação, exceto em três áreas, como apresenta o gráfico da figura 27.

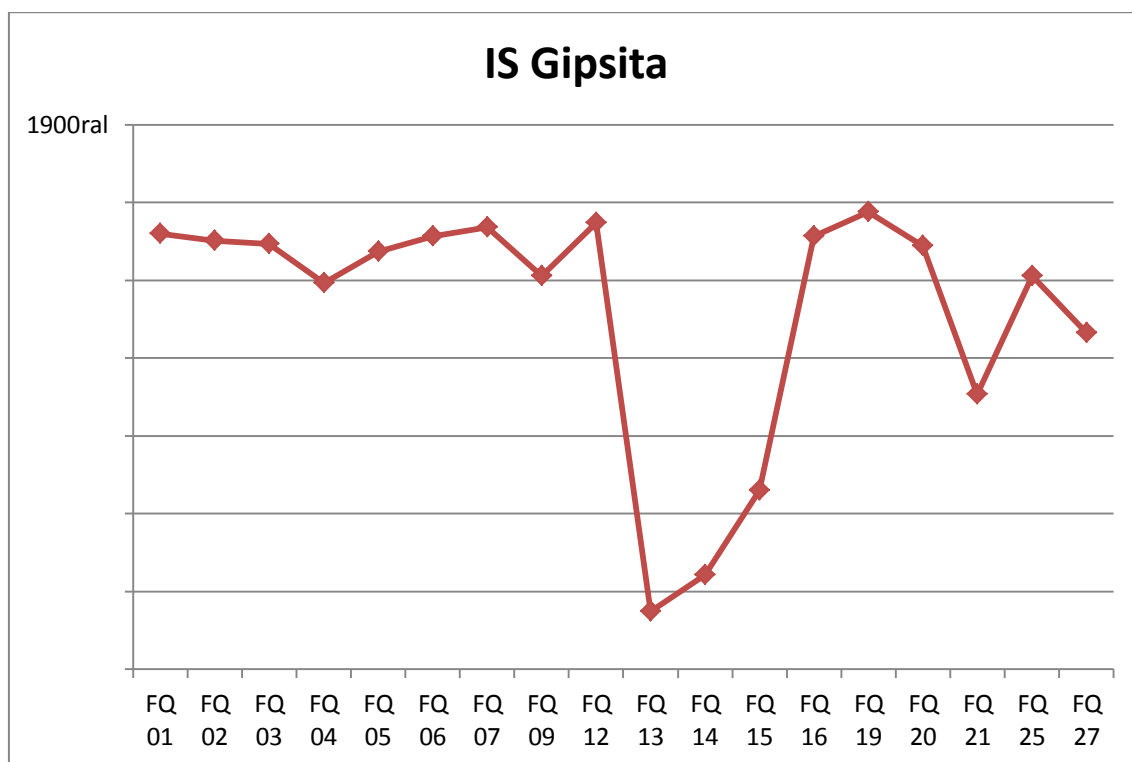


Figura 27 - Índice de Saturação da Gipsita das águas subterrâneas da área do estudo.

4.2.6.7 Índice de saturação da Goethita e Hematita.

Os Índices de Saturação da Goethita e Hematita (figuras 28 e 29) possuem o mesmo padrão e encontram-se supersaturados em alguns pontos e insaturados em outros. As anomalias de ferro estão representadas pelos pontos em vermelho, observa-se que estes pontos encontram-se distribuídos entre supersaturados e insaturados indicando que as anomalias de Fe são pontuais.

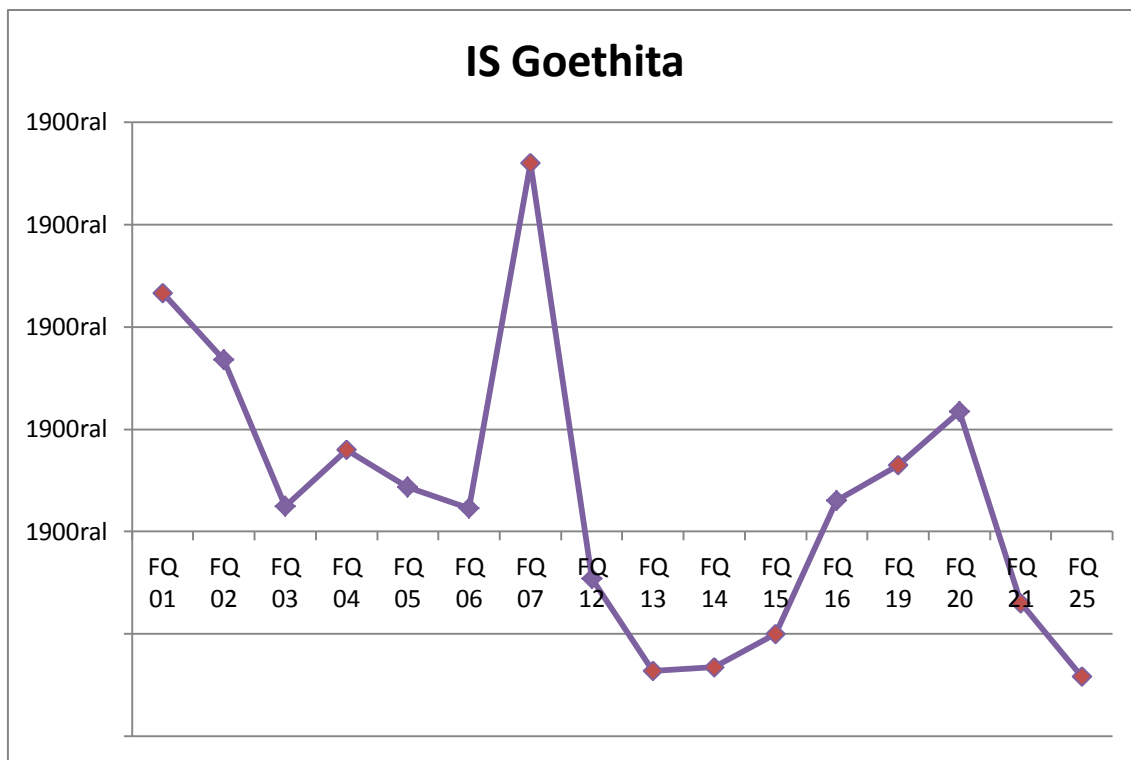


Figura 28 - Índice de Saturação da Goethita das águas subterrâneas da área do estudo.

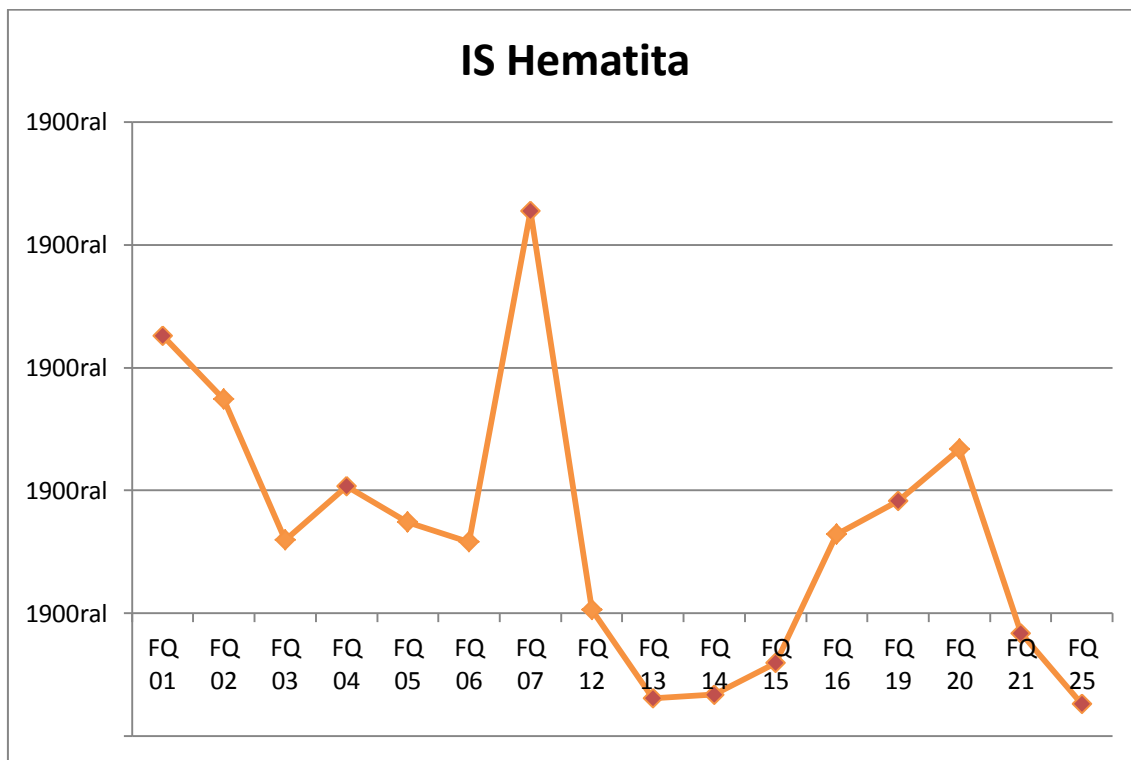


Figura 29 - Índice de Saturação da Hematita das águas subterrâneas da área do estudo.

4.2.7 Isotopia

Foram realizadas amostragens e análises isotópicas em seis pontos da área de estudo, a distribuição dos pontos seguiu um critério de abrangência e representatividade da área conforme apresentado na figura 30 e Tabela 12. A camada aquífera mais profunda (FQ 09) tem uma assinatura isotópica algo distinta das demais águas analisadas, confirmando seu isolamento e recarga distante, com valores mais depletados em ^{18}O e ^2H .

Tabela 12 - Dados Isotópicos da área do estudo

ID	ID FQ	X	Y	Prof. (m)	Distância ao Mar (Km)	$\delta^{18}\text{O} \text{ ‰}$	$\delta^2\text{H} \text{ ‰}$	Excesso de Deutério
Ponto 1	FQ 01	709002	7461092	15	2,81	-3,62	-16,70	12,26
Ponto 3	FQ 02	708900	7458825	25	0,67	-3,75	-17,50	12,50
Ponto 13	FQ 07	703827	7458552	15	0,63	-3,82	-18,40	12,16
Ponto 15	FQ 09	711520	7458045	40	0,93	-3,97	-19,50	12,26
Ponto 16	FQ 10	707353	7459298	18	0,94	-3,55	-15,70	12,70
Ponto 26	FQ 12	710444	7458685	-	0,57	-3,93	-18,50	12,94

Análises Isotópicas

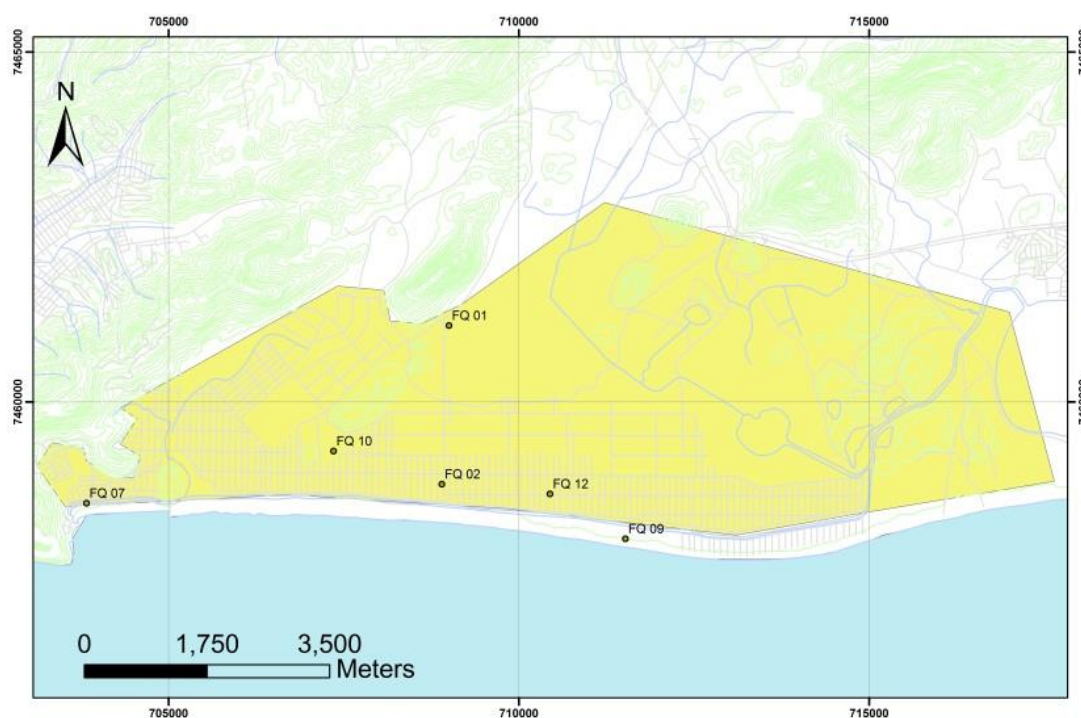


Figura 30 - Distribuição dos pontos com análises isotópicas da área do estudo.

Com o objetivo de identificar a fonte da recarga do aquífero as amostras foram plotadas no gráfico $\delta^{18}\text{O}$ x $\delta^2\text{H}$ e comparadas com a Reta Meteórica Mundial (RMM). Percebe-se que as amostras estão alinhadas com a RMM com muito pouca diferença dos valores desta, indicando a origem meteórica das águas dos aquíferos locais. A figura 31 representa os valores da área de estudo relacionados à reta meteórica mundial. Nota-se que as análises da água do aquífero seguem a RMM, indicando a influencia da água da chuva no aquífero.

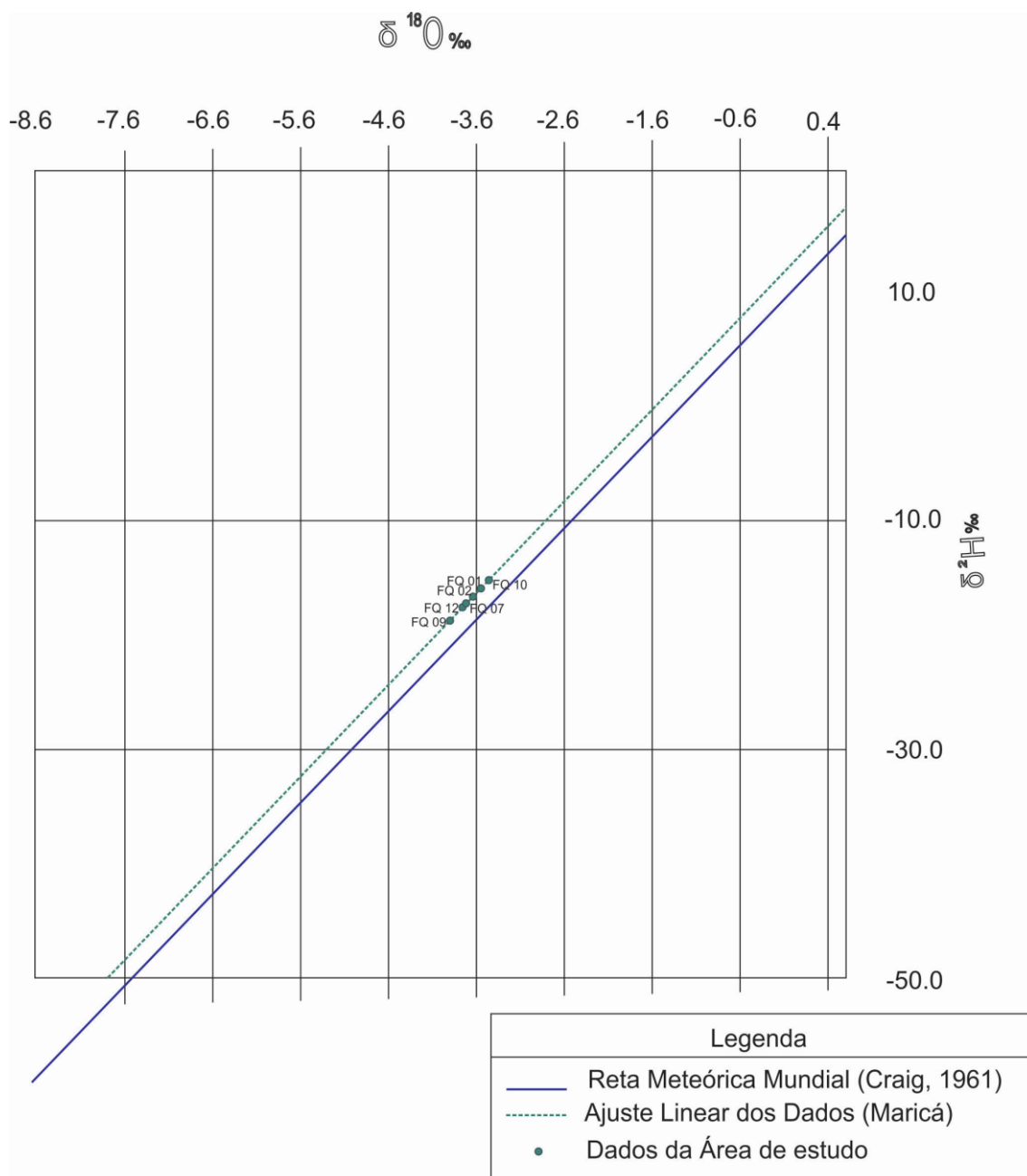


Figura 31 – Reta meteórica da razão Deutério x Oxigênio-18 da área do estudo.

A figura 32 apresenta, a partir da relação $\text{Cl} \times ^{18}\text{O}$, as influências que a água subterrânea pode sofrer. Representa as relações, a partir da amostra dos valores de ^{18}O , da reta meteorológica mundial. A figura 33 representa as mostras da área de estudo, onde pode ser observada uma tendência das amostras a influência de evaporação, corroborando para a hipótese da água de recarga provir da água da chuva. A exceção corre por conta da amostra FQ-09, do aquífero profundo (única amostra da pesquisa nesse aquífero), cujo caráter seria mais representativo de fenômenos de dissolução e lixiviação de minerais hidratados, em consonância com o maior tempo de residência dessa água subterrânea no subsolo.

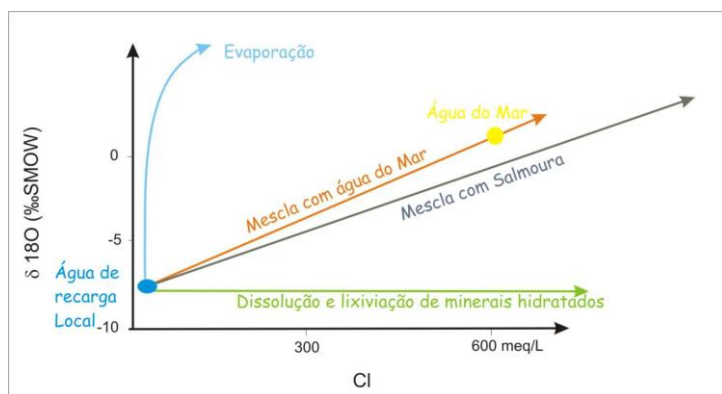


Figura 32 - Mecanismos de Identificação de Salinidade (Adaptado de Manzano Arellano, 2013)

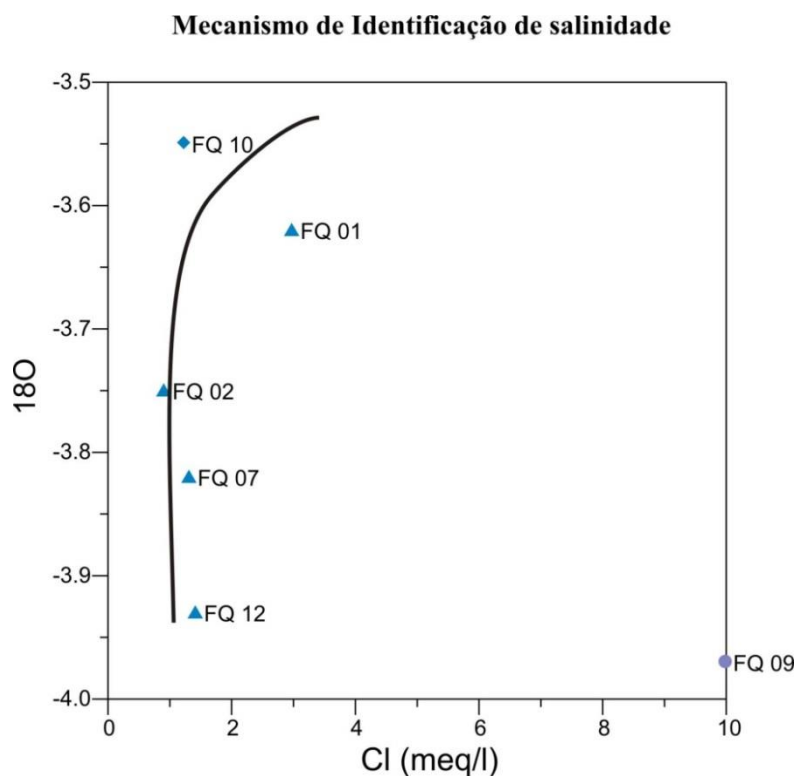


Figura 33 - Relação $\text{Cl} \times ^{18}\text{O}$ representando o mecanismo de identificação de salinidade da área do estudo segundo Manzano Arellano (2013).

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Durante a presente pesquisa pôde-se observar que grande parte da população faz uso do aquífero mais superficial na área de Itaipuaçu, já que a profundidade média dos poços construídos varia entre oito e quinze metros de profundidade. Este aquífero costeiro apresenta características de um aquífero livre, raso, com grande importância para abastecimento hídrico da população da região. Para sua caracterização foram realizados estudos hidroquímicos, compreendendo a obtenção de parâmetros físico-químicos e isotópicos.

Como resultado da avaliação de condutividade elétrica e sólidos totais dissolvidos, observou-se que a exploração do aquífero costeiros de Itaipuaçu não resultou até o momento em sua salinização ou avanço da cunha salina marinha, pois as amostras apresentaram média de 153,00 mg/L de STD (abaixo do permitido pela Resolução 396/2008 do CONAMA para águas subterrâneas e da Portaria nº 2914/2011 do Ministério da Saúde). A água subterrânea foi classificada como sendo aceitável para a maioria dos usuários. A RAS corrobora para essa classificação, pois os resultados encontrados permitem classificar a maioria das águas nas classes C1-S1 e C2-S1.

Os resultados de caracterização das fácies hidrogeoquímicas indicam que as águas dos poços monitorados são, predominantemente, cloretadas-sódicas, refletindo influência marinha nestas águas. Alguns parâmetros químicos encontraram-se acima dos valores máximos permitidos em vários poços, com destaque para o ferro, o alumínio e para o nitrato.

No caso do nitrato, os valores superiores ao VMP estabelecido pela resolução 396/2008 nos poços monitorados podem ser indicativos de contaminação da água subterrânea por atividade humana (esgotos e fossas sépticas), sobretudo falta de planejamento na construção das fossas sépticas, muitas delas localizam-se muito próximas aos poços.

As razões iônicas utilizadas neste trabalho mostraram ser ferramentas que podem ajudar na interpretação deste aquífero, mas precisam ser aperfeiçoadas através de um maior número de amostragens a fim de se realizar um estudo de caráter comparativo mais completo.

Os valores das razões iônicas rNa/rCl e rCl/rBr para as águas analisadas apresentam similaridade com a água do mar, as razões de rMg/rCa e $rCl/rHCO_3$ indicam uma assinatura

geoquímica continental. As relações iônicas para os poços corroboram os dados apresentados até então, mostrando que essas águas teriam composição de caráter continental com influência marinha, uma vez que se encontram muito próximas ao mar e, tratando-se de um aquífero de pequena profundidade, sofrem grande influência dos aerossóis marinhos.

Os resultados obtidos pelo *PhreeqcI* em relação aos índices de saturação mostram que os minerais de ferro e alumínio possuem uma tendência a se precipitarem mais que os minerais carbonatados e sulfatados.

A partir da análise dos isótopos estáveis ^{18}O e ^2H nota-se que a água do aquífero está diretamente relacionada com a recarga pela água da chuva.

A partir dos dados coletados e analisados nesta pesquisa conclui-se que o aquífero costeiro de Itaipuaçu não apresenta nenhum indício que comprove que estaria ocorrendo intrusão marinha. As camadas de argila e matéria orgânica presentes na extensão da baixada de Itaipuaçu, do canal da Costa para norte da área, funcionam como uma barreira a salinidade, o que evita que o mar mescle suas águas com as do aquífero.

Como sugestões a pesquisas, foram analisadas as necessidades futuras, permitindo a elaboração de sugestões e recomendações, possibilitando uma melhor caracterização da área de estudo.

- Sugere-se a ampliação da malha de poços nivelados, e realizar medições de seus níveis potenciométricos de forma periódica, buscando caracterizar os períodos de cheia e seca, assim como coletas nos períodos verão, inverno e verão para fechar um ciclo hidrológico possibilitando melhores avaliações.
- melhor caracterização do aquífero mais profundo (cerca de 40 m de profundidade), ampliando o cadastro perfurando de novos poços que o monitorem, bem como realizar ensaios para obtenção de seus parâmetros;
- realizar análise adicionais isotópicas da água da chuva para ampliar as pesquisas e então aprimorar os resultados.

6 BIBLIOGRAFIA

ALCALÁ, F.J.; CUSTODIO, E. Using the Cl/Br ratio as a tracer to identify the origin of salinity in aquifers in Spain and Portugal. *Journal of Hydrology* 359(1):189-207, 2008.

ALMEIDA, G.M.; SILVA Jr, G.C. Fatores Hidrogeológicos no Estudo da Intrusão Salina em Aquíferos Costeiros da Região Litorânea do Município de Maricá – RJ. *Anuário de Geociências*, Rio de Janeiro, v. 30-2, p.104-117, 2007.

ALMEIDA, G.M. Estudo do Aquífero Costeiro de Maricá – RJ Instrumentação e Investigação do Comportamento da Cunha Salina. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Geologia, Instituto de Geociências, UFRJ, Rio de Janeiro, 2009. 109p.

ALMEIDA, G.M e PERALTA TAPIA, A. Hydrogeological Characterization in the Barra of Maricá, RJ, Brazil. MSc. Thesis Project. Vrije Universiteit, Amsterdam. 2009.

ALVES, M.G. Diagnóstico ambiental da Região Oceânica de Niterói e Distrito de Inoã – Maricá (RJ): uma visão por geoprocessamento e mapeamento geológico-geotécnico. Tese de Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Geologia, Instituto de Geociências, UFRJ, Rio de Janeiro, 2000. 175p.

APPELO, C. A. J.; POSTMA, D. Geochemistry, Groundwater and Pollution. 2nd Ed. A Balkema. Rotterdam, Brookfield, 2005. 728 p.

BENTO, E.S. Hidrogeoquímica e Modelo Hidrogeológico das Águas Subterrâneas no Baixo curso do Rio Macaé, Município de Macaé – RJ. Dissertação de Mestrado. UFRJ. 1999.

CABRAL, J.J.S.P. e PAIVA, A.L.R. Água subterrânea: Aquíferos Costeiros e Aluviões, Vulnerabilidade e Aproveitamento. Capítulo 4 – Salinização de Aquíferos Costeiros: Investigação e Modelagem, Recife: Ed Universitária da UFPE. 2004.

CIDE - FUNDAÇÃO CENTRO DE INFORMAÇÕES E DADOS DO RIO DE JANEIRO. Território. 2. ed. Rio de Janeiro: CIDE. 1998. 80p.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente – Resolução 396 de 03 de abril de 2008. Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências.

CPRM. Geologia do Estado do Rio de Janeiro: Mapa geológico de Maricá. Org.: Luiz Carlos da Silva e Hélio Canejo da Silva Cunha. –Brasília: CPRM. 2ª edição revista em 2001.

CPRM. Geologia do Estado do Rio de Janeiro: texto explicativo do mapa geológico do Estado do Rio de Janeiro. Org.: Luiz Carlos da Silva e Hélio Canejo da Silva Cunha. –Brasília: CPRM. 2ª edição revista em 2001.

CRAIG, H., 1961. Isotopic variations in meteoric waters. Science 133, 1702–1703

CRISTO, V. N. Caracterização Hidrodinâmica e Modelo Conceitual do Aquífero de Itaipuaçu, Maricá – RJ com Uso de Ferramentas Hidrogeoquímicas. Dissertação de Mestrado. UFRJ 2013

CRUZ, A.; SILVA JR., G.C. Spatial and temporal hydrochemical behavior of Piratininga coastal aquifer. Niteroi City, Brazil. In: 19th Saltwater Intrusion Meeting, 43 Cagliari, Itália. Proceedings of the 19th SWIM. Cagliari : U. Cagliari, 2006. v. 1. p. 12-18, 2006.

CRUZ, A. Aplicação de Modelagem Hidrogeoquímica na Avaliação de Processos de Salinização de Aquíferos no Litoral Leste do Estado do Rio de Janeiro. 2006. 116p. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

CUSTODIO, E.; BRUGGEMAN, G. A. Groundwater Problems in a Coastal Areas. Paris: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, 1987. 596 p.

CUSTODIO, E.; LLAMAS, M. R. Hidrología Subterránea. 2ed. Barcelona: Ed. Omega, 1983, 2.v.

EGER, G.Z.S. Aspectos Hidrodinâmicos, Balanço Hídrico e Simulação de Fluxo no Aquífero Costeiro de Itaipuaçu, Maricá – RJ. Trabalho de Conclusão de Curso. Departamento de Geologia Rio de Janeiro Dezembro. 2012

FEITOSA, F. E FILHO, M. - Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações 3ª Edição – revisada e ampliada/ Coordenado por Fernando A. C. Feitosa & João Manoel Filho. Fortaleza – CPRM/REFO, LABHID-UFPE, 2008, 812 p.

GASTMANS, D. et al. Implicações hidroquímicas da interação rocha-água: interpretações através da representação gráfica de análises químicas de águas subterrâneas. IN: SUPLEMENTO - XIV Encontro Nacional de Perfuradores de Poços e II Simpósio de Hidrogeologia do Sudeste. 2005.

GOMES, O. V. O. et al. Análise da Salinidade dos Aquíferos na Bacia do Macacu, Itaboraí – RJ. In: ABAS - Águas Subterrâneas V.27, n.2 p.1-15. 2013.

GOMES, D.F., FRISCHKORN, H., FREIRE J. S. S. Medidas de $\delta^{18}\text{O}$ e Hidroquímica de Águas Superficiais e Subterrâneas no Estudo Da Interação Rio – Aquífero, Na Região De Limoeiro do Norte – Baixo Jaguaribe – Ce. In: ABAS - Águas Subterrâneas V.21, n.1 p.93-109. 2007.

HAN, D. et. al. Geochemical and isotopic evidence for palaeo-seawater intrusion into the south coast aquifer of Laizhou Bay, China. *Applied Geochemistry*.;26 (1): 863-83, 2011.

INMET - BDMEP - Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep> (acessado em 15/08/2013).

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Síntese de Indicadores Sociais 2008. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 18 jun. 2010. ____ Síntese de Indicadores Sociais 2009. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/>. Acesso em: 18 jun. 2010.

KÖPPEN, W. The Climates of North America. R. Handbuch des Klimatologie, Berlim. 1948.

MANZANO ARELLANO, M. Curso de Introdução a isotopia e hidroquímica. Instituto de Radioproteção e Dosimetria – Rio de Janeiro, 2013.

MINISTÉRIO DA SAÚDE – Portaria nº 2914 de 12 de dezembro de 2011. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade.

MUEHE, D. O litoral brasileiro e sua compartimentação. Cunha, S.B. & Guerra, A.J.T. organizadores. *Geomorfologia do Brasil*. Rio de Janeiro: Editora Bertrand Brasil S.A., 1998. Capítulo 7.

MUEHE, D.; CARVALHO, V. G. Morfologia e distribuição dos sedimentos na plataforma continental interna entre Saquarema e Cabo Frio. *In: 1º SIMPÓSIO SOBRE OCEANOGRAFIA*, 1989, Resumos. São Paulo, p. 87-58.

MUEHE, D.; VALENTINI, E. O litoral do Rio de Janeiro: uma caracterização físico-ambiental. *FEMAR*, 1998, 123p.

PARKHURST, D. L., APPELO, C. A. J. User's guide to *PhreeqcI* – a computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. Colorado: U. S. Geological Survey. Water-Resources Investigations Report 99-4259. 2005.

PEREIRA, A.J. et. al. A utilização do Ground Penetrating Radar (GPR) em estudos de estratigrafia na praia de Itaipuaçu - Maricá (RJ). *Rev. Bras. Geof.* [online]..21 (2):163-172, 2003.

PERRIN, P., Evolução da costa Fluminense entre as pontas Itaquatiara e Negra, preenchimentos e Restingas. p. 65-73. *In: Restingas, Origem, Estrutura, Processos*. Lacerda, L.D.; Araújo, D.S.D.; Cerqueira, R. e Turcq, B. (Eds.). CEUFF Niterói. 1984

SANTOS. Noções de Hidroquímica. *In FEITOSA, F.A.C.;MANOEL FILHO, J. Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações*. Fortaleza: CPRM, 2000, p. 81-102.

SEABRA, V.S.; SILVA JR., G.C.; CRUZ, C.B.M. The use of geoprocessing to assess vulnerability on the east coast aquifers of Rio de Janeiro State, Brazil. *Environmental Geology*. 57(3):665–674. 2009.

SILVA, C. Curso de Interpretação de Análises Físico-químicas e Isotópicas. Lab. Hidrogeologia, Dep. Geologia UFRJ. 2012.

SILVA JR. G.C.; LOWSBY, M.; SOUZA, M. G. A problemática da intrusão marinha nos Aquíferos costeiros do leste Fluminense: um estudo de caso – a Região Oceânica de Niterói. In: CONGRESSO MUNDIAL INTEGRADO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. Fortaleza - CE. Anais, v. 1, p.15-25. 2000

SILVA JR, G.C.; PIZANI T.C. Vulnerability Assessment in Coastal Aquifers Between Niterói and Rio das Ostras, Rio de Janeiro State, Brazil. *Rev Lat Am Hidrogeol*, 3(1):93-99, 2003.

SIVAN, O. *et al.* Geochemical evolution and timescale of seawater intrusion into the coastal aquifer of Israel. *Geochem. Cosmochim Acta*; 69:579-92, 2005.

TAPIA, A. P. Hydrogeological Characterization in the Barra of Maricá, RJ, Brazil. Dissertação de Mestrado, Vrije Universiteit. Amsterdam, 2009.

TODD, D. K. Groundwater Hydrology: John Wiley e Sons, inc.- New York, 1959.

TODD, D. K. Groundwater Hydrology. John Wiley e Sons, Inc., New York, 1980 v. 2.

TURCQ, B. *et al.*, (1999) - Origin and evolution of the quaternary coastal plain between Guaratiba and Cabo Frio, State of Rio de Janeiro, Brazil. *Environmental Geochemistry of Coastal Lagoon Systems*, Rio de Janeiro, v. 6, p. 25-46, 1999. Série Geoquímica Ambiental.

USSL – US Salinity Laboratory <http://www.ars.usda.gov>

APÊNDICES

Apêndice 1 - Cadastro de Poços da área do estudo

ID	Análise FQ	X	Y	Prof. (m)	Nível (m)	pH	CE(μS)	POR (mV)	STD (mg/L)	Proprietário
01		709000	7460269	12		3.50	315		158	Sr. Gilson
02	FQ 01	709002	7461092	15	2.85	6.12	1030	253	515	D.Palmira Real Park Hotel
03		709025	7461033	15	6.78	5.97	850	198	425	D.Palmira Real Park Hotel
04	FQ 02	708900	7458825	25		5.75	313		157	D. Patrícia Loja de Artesanato da Rua 1 lote 16 Q 116
05		708907	7458325			8.04	4000	211	2000	Mar
06		709464	7458915	12		5.32	184		92	Cond. Flor de Cactus Rua 34 c/49
07		710290	7458584			4.88	292	330	146	Sr. Jorge/Leo (Caseiro) R.58 Q.242 L.26 casa 26
08	FQ 03	712405	7458442	16	7.40	5.22	202	235	101	Sr. Pedro Paulo R.82 Q 428 L 43
09		712538	7458074			6.68	4000	223	2000	Canal de Itaipuaçu
10	FQ 04	713533	7457945			5.04	240	227	120	D. Rita ou Sr. Ari Rua 140 Q 541 L 24 casa 1
11		712536	7459315	15		5.78	75	-44	38	Sr. Luciano
12	FQ 05	710300	7458540	8		5.50	334	207	167	Sr. Wallace R.58 Q 242 L 31
13	FQ 06	708699	7458929			5.30	367	220	184	Mecânica All Car Paulo/ André
14	FQ 07	703827	7458552	15		8.40	426	-32	213	Sr. Pedro
15	FQ 08	710763	7458687	12	5.61	5.96	199	164	100	D. Sandra R.66 Q 313 L 32
16	FQ 09	711520	7458045	40		7.25	788	-88	394	Sr. Wandelely (Cantinho do Wandeco) R.72 Q.393 L4
17	FQ 10	707353	7459298	18		5.18	314	-197	157	Sr. Roberto
18	FQ 11	706305	7459330	10-12		6.00	365	-96	183	D. Barbara e Sr. Guilherme R. 26 Q 84 L25
19		714901	7458638			6.95	4000	176	2000	Canal de Itaipuaçu
20		713764	7458515	7		6.70	362	188	181	Dorival
21		711262	7458474	12		4.95	200	245	100	Sr. Nilton
22		710992	7458720	10-15		6.09	284	250	142	D. Aline
23		714925	7458401			5.13	288	232	144	D. Jaqueline
24		711234	7458875	18		5.90	89	145	45	Sr. Humberto Rua 76 Q 383 L7
25		711287	7458822	8-12		5.50	86	-143	43	Sr. Leonardo Rua 34 Q 383 L5
26		710260	7459150	16		5.82	113	-145	57	Cond. Novo de esquina Av. 2 c/ Rua 59
27	FQ 12	710444	7458685			4.55	248	248	124	Rua 35 esquina com rua 57 Poço da Casa da Ariadne
28		710445	7458684	12		5.10	331	190	166	Poço estratigráfico feito na Casa da Ariadne
29	FQ 13	711886	7460107			5.95	101	-184	51	D. Dilma R.76 Q 380
30	FQ 14	709986	7460398		1.24	5.86	120	-168	60	D. Isabel Esquina de R.54 c/ R.40 Q.222 L6
31	FQ 15	708276	7459509	17		5.75	193	-154	96	D. Maria Goes Rua 32 Q31 L21 C4

ID	Análise FQ	X	Y	Prof. (m)	Nível (m)	pH	CE(μS)	POR (mV)	STD (mg/L)	Proprietário
32	FQ 16	705482	7459714			5.47	284	176	145	Sr. Reginaldo R18 Q 42 L36
33	FQ 17	710142	7458409			6.81	33200	69	17000	Água do Canal com coloração levemente amarelada.
34	FQ 18	711084	7458033			8.20	47500	67	23750	Água do Mar
35	FQ 19	704763	7458999			4.80	166	196	83	D. Andrea R.18 Q12 L7
36	FQ 20	704953	7460100	15		5.90	515	146	258	R.8 Q 39 L 30
37	FQ 21	710285	7459856	12	2.20	6.10	130	-156	65	Sr. Willian Av.2 Q.247 L4 C2
38	FQ 22	712390	7460936			4.26	751	338	376	Mineração Santa Joana
39	FQ 23	716867	7460264				26600		13300	Lagoa de Maricá
40		716586	7460935			6.73	16900	158	8450	Canal do Rio Brejo da Costa
41		711258	7459307	14	2.00	6.31	93	-139	47	Sr. Igor R. 69 Q 341 L7
42		713015	7458364			4.98	295	222	148	D. Dulce
43	FQ 24	714872	7458911			6.35	14	150	7	Canal de São Bento, R.34 esquina de R. 128
44		714880	7458915	8-10	2.00	5.88	153	-36	77	D. Barbara R.34 Q 537 L23
45		710322	7459237		3.00	6.25	137	-90	69	R.58 Q 245 C2
46		707712	7459059			5.16	270	230	135	D. Heloisa R.16 Q 56 L33
47		707006	7459036			5.52	269	207	13	
48		705957	7459095	12		4.88	233	234	117	R.13 Q 19 L35
49		704942	7460269		0.93	5.79	664	161	332	R.26 Q 44 L2
50		708966	7459564	20	1.44	6.6	417	-70	209	
51	FQ 25	710034	7458915	9	3	4.50	253	62	126	R.33 Q 226 L.25
52	FQ 26	710568	7461948			8.07	986	55	484	Canal ponte na rua 28 prox lote 48 (chácara de Inoã)
53		710135	7458427	12		5.67	12520	53	6240	2° Poço Estratigráfico
54		715849	7458582	0.75	0.3	6.73	240	100	121	Pequeno de manilha feito em um areal (Maracanã)
55		711233	7462469			7.54	574	102	52	Rio Preguiça que deságua na Lagoa Brava
56		704992	7459287			6.62	324	-40	161	Rio Itocáia- prox. ao Recanto
57	FQ 27	716479	7458803	12	1.1	4.7	209	300	103	Base da Aeronáutica

Apêndice 2 – Cálculo do Erro de análise das amostras.

ID	SO ₄ ⁻²	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	Ca	Mg	Na	K	r \sum p	r \sum n	r \sum p - r \sum n	r \sum p + r \sum n	Erro
FQ 01	1.04	1.17	2.96	0.37	0.73	5.96	0.04	7.09	5.17	1.92	12.26	15.64
FQ 02	0.49	0.59	0.89	0.38	0.21	1.40	0.21	2.20	1.97	0.23	4.17	5.49
FQ 03	0.25	0.59	0.78	0.61	0.24	1.35	0.18	2.38	1.62	0.76	4.00	19.05
FQ 04	0.28	0.59	0.71	0.05	0.12	1.07	0.14	1.38	1.58	-0.20	2.95	-6.72
FQ 05	0.23	0.59	0.73	0.39	0.16	0.92	0.10	1.57	1.55	0.02	3.12	0.59
FQ 06	0.47	0.59	0.85	0.53	0.21	1.62	0.25	2.61	1.91	0.70	4.52	15.50
FQ 07	0.76	0.59	1.30	0.60	0.22	2.03	0.15	3.00	2.64	0.36	5.64	6.34
FQ 08	0.00	5.70	0.68	0.67	0.22	0.73	0.10	1.72	6.39	-4.67	8.11	-57.56
FQ 09	0.05	1.51	9.94	0.89	1.45	10.95	0.22	13.51	11.50	2.01	25.00	8.04
FQ 10	0.01	0.27	1.20	0.17	0.34	1.62	0.16	2.29	1.48	0.81	3.77	21.57
FQ 11	0.00	0.63	1.33	1.12	0.29	1.63	0.18	3.21	1.96	1.25	5.17	24.22
FQ 12	0.95	0.04	1.40	0.63	0.21	1.94	0.24	3.02	2.39	0.63	5.41	11.66
FQ 13	0.00	0.22	0.65	0.14	0.11	0.42	0.03	0.69	0.88	-0.19	1.57	-12.19
FQ 14	0.00	0.23	0.60	0.15	0.09	0.40	0.02	0.67	0.84	-0.17	1.50	-11.56
FQ 15	0.03	0.28	1.08	0.23	0.20	0.88	0.04	1.36	1.39	-0.04	2.75	-1.30
FQ 16	0.70	0.15	1.05	0.36	0.24	1.44	0.20	2.24	1.89	0.36	4.13	8.60
FQ 17 - canal	41.46	1.66	380.28	13.70	70.08	303.03	6.21	393.02	423.40	-30.38	816.41	-3.72
FQ 18 - mar	61.88	2.43	600.00	20.60	110.00	463.20	10.00	603.80	664.30	-60.50	1268.10	-4.77
FQ 19	1.89	0.03	2.28	0.71	0.46	2.29	0.17	3.63	4.20	-0.57	7.83	-7.32
FQ 20	0.53	0.63	2.71	0.31	0.58	3.44	0.04	4.37	3.87	0.50	8.24	6.07
FQ 21	0.00	0.31	0.61	0.27	0.12	0.50	0.04	0.93	0.92	0.01	1.85	0.37
FQ 22 - mineração	4.40	0.00	2.08	1.44	1.81	2.17	0.36	5.78	6.47	-0.69	12.25	-5.67
FQ 23 - lagoa	30.63	1.69	281.13	9.25	50.58	216.45	4.67	280.95	313.44	-32.49	594.39	-5.47
FQ 24 - canal	16.40	1.06	146.76	5.50	25.67	106.93	2.41	140.50	164.22	-23.71	304.72	-7.78
FQ 25	0.24	0.03	1.38	0.09	0.28	1.22	0.05	1.64	1.65	0.00	3.29	-0.10
FQ 26 - canal	0.49	6.44	3.04	1.13	0.87	4.06	0.38	6.44	9.97	-3.53	16.41	-21.54
FQ 27	0.20	0.08	1.02	0.23	0.23	0.85	0.04	1.34	1.30	0.04	2.64	1.38

Apêndice 3 - Tabela contendo os Íons maiores usados para a confecção dos diagramas químicos da água

ID	Coordenadas		pH	condutividade elétrica	STD	Ânions (mg/L)			Cátions (mg/L)			
	X	Y				SO ₄	HCO ₃	Cl	Ca	Mg	Na	K
FQ 01	709002	7461092	6.49	691	515	49.95	71.50	105.03	7.31	8.72	137.65	1.48
FQ 02	708900	7458825	6.05	243	157	23.58	35.75	31.68	7.53	2.46	32.44	8.30
FQ 03	712405	7458442	5.87	267	101	11.93	35.75	27.83	12.18	2.85	31.19	7.16
FQ 04	713533	7457945	5.19	177	120	13.26	35.75	25.31	0.96	1.45	24.61	5.57
FQ 05	710300	7458540	5.00	212	167	11.05	35.75	26.04	7.79	1.91	21.33	3.75
FQ 06	708699	7458929	5.50	315	184	22.66	35.75	30.23	10.67	2.50	37.44	9.66
FQ 07	703827	7458552	5.00	370	213	36.30	35.75	46.15	12.08	2.65	46.81	5.80
FQ 09	711520	7458045	6.61	1378	394	2.17	92.00	353.00	17.70	17.40	253.00	8.54
FQ 12	710444	7458685	4.62	478	124	45.70	2.22	49.80	12.60	2.56	44.70	9.53
FQ 13	711886	7460107	6.30	103	51	0.23	13.70	23.20	2.84	1.26	9.67	0.99
FQ 14	709986	7460398	6.12	98	60	0.09	14.30	21.40	3.04	1.03	9.34	0.90
FQ 15	708276	7459509	5.69	191	96	1.38	17.30	38.30	4.60	2.43	20.30	1.73
FQ 16	705482	7459714	5.41	279	145	33.40	8.95	37.10	7.18	2.90	33.30	7.83
FQ 17 - Canal	710142	7458409	7.11	37000	17000	1,990.00	101.00	13,500.00	274.00	841.00	7,000.00	242.00
FQ 18 - Mar	711084	7458033	8.06	55000	23750	2,970.00	148.00	21,300.00	412.00	1,320.00	10,700.00	390.00
FQ 19	704763	7458999	4.69	483	83	90.90	2.09	80.80	14.10	5.50	53.00	6.75
FQ 20	704953	7460100	5.95	550	258	25.40	38.60	96.20	6.11	7.00	79.50	1.63
FQ 21	710285	7459856	5.99	122	65	0.22	18.80	21.70	5.46	1.42	11.60	1.46
FQ 22 - Mineração	712390	7460936	3.96	778	376	211.00	0.00	73.70	28.80	21.70	50.20	13.90
FQ 23 - Lagoa	716867	7460264	7.57	27000	13300	1,470.00	103.00	9,980.00	185.00	607.00	5,000.00	182.00
FQ 24 - Canal	714872	7458911	7.15	15000	7	787.00	64.70	5,210.00	110.00	308.00	2,470.00	94.00
FQ 25	710034	7458915	4.26	228	126	11.30	1.97	49.00	1.83	3.36	28.20	2.05
FQ 27	716479	7458803	6.43	173	103	9.76	4.75	36.30	4.50	2.70	19.55	1.17

Apêndice 4 - Razões Iônicas e Concentrações iônicas (meq/L)

ID	X	Y	Mg/Ca	Na/Cl	Cl/Br	Cl/HCO ₃
FQ 01	709002	7461092	1,988	2,014	288,282	2,524
FQ 02	708900	7458825	0,544	1,574	1426,046	1,523
FQ 03	712405	7458442	0,390	1,722	2087,903	1,338
FQ 04	713533	7457945	2,517	1,494		1,217
FQ 05	710300	7458540	0,409	1,259		1,252
FQ 06	708699	7458929	0,391	1,903		1,453
FQ 07	703827	7458552	0,366	1,559		2,218
FQ 09	711520	7458045	1,638	1,101	19,569	6,593
FQ 12	710444	7458685	0,339	1,379	700,532	38,546
FQ 13	711886	7460107	0,739	0,641	856,006	2,910
FQ 14	709986	7460398	0,565	0,671	789,591	2,571
FQ 15	708276	7459509	0,880	0,815	615,728	3,804
FQ 16	705482	7459714	0,673	1,379	938,215	7,123
FQ 17	710142	7458409	5,116	0,797	6089,080	229,675
FQ 18	711084	7458033	5,340	0,772	9607,214	247,297
FQ 19	704763	7458999	0,650	1,008	1010,316	66,430
FQ 20	704953	7460100	1,909	1,270	676,618	4,282
FQ 21	710285	7459856	0,433	0,822	626,157	1,983
FQ 22	712390	7460936	1,256	1,047	571,989	
FQ 23	716867	7460264	5,468	0,770	594,234	166,493
FQ 24	714872	7458911	4,667	0,729	586,308	138,368
FQ 25	710034	7458915	3,060	0,884	648,732	42,740
FQ 27	716479	7458803	1,000	0,828	680,838	13,132

Apêndice 5 - Tabela de cálculo do RAS (Razão de adsorção de sódio)

ID	Ca	Mg	Na	RAS
FQ 01	0.366	0.727	5.959	8.06
FQ 02	0.377	0.205	1.404	2.60
FQ 03	0.609	0.238	1.350	2.08
FQ 04	0.048	0.121	1.065	3.67
FQ 05	0.390	0.159	0.923	1.76
FQ 06	0.534	0.208	1.621	2.66
FQ 07	0.604	0.221	2.026	3.16
FQ 09	0.885	1.450	10.952	10.14
FQ 12	0.630	0.213	1.935	2.98
FQ 13	0.142	0.105	0.419	1.19
FQ 14	0.152	0.086	0.404	1.17
FQ 15	0.230	0.203	0.879	1.89
FQ 16	0.359	0.242	1.442	2.63
FQ 19	0.705	0.458	2.294	3.01
FQ 20	0.306	0.583	3.442	5.16
FQ 21	0.273	0.118	0.502	1.14
FQ 25	0.092	0.280	1.221	2.83
FQ 27	0.225	0.225	0.846	1.78